



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

MODELIZACIÓN, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DE UN  
SISTEMA DE AUTO-REFRIGERACIÓN TERMOELÉCTRICA

Jose Javier Lorrio Romera

Tutores: David Astrain Ulibarrena

Álvaro Martínez Echeverri

Pamplona, 26/11/2010



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

MODELIZACIÓN, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DE UN  
SISTEMA DE AUTO-REFRIGERACIÓN TERMOELÉCTRICA

MEMORIA

Jose Javier Lorrio Romera

Tutores: David Astrain Ulibarrena

Álvaro Martínez Echeverri

Pamplona, 26/11/2010

*Quiero expresar mi agradecimiento a David Astrain Y  
Álvaro Martínez, mis tutores en este proyecto, por su  
incalculable ayuda y apoyo durante estos meses.*

*A mis padres y a mi hermano, por haber estado  
siempre a mi lado en estos seis años.*

*Y a María, porque sin ella no habría conseguido llegar  
hasta aquí.*

*“El hombre es energía dirigida por inteligencia”  
Anónimo*

## 0-ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| 1-ANTECEDENTES.....                             | 2  |
| 2-OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA .....     | 5  |
| 3-INTRODUCCIÓN A LA TERMoeLECTRICIDAD.....      | 8  |
| 4-DESCRIPCIÓN EQUIPO DE AUTO-REFRIGERACIÓN..... | 24 |
| 5-IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL.....             | 29 |
| 6-ESTUDIO COMPUTACIONAL .....                   | 34 |
| 7-ESTUDIO EXPERIMENTAL.....                     | 40 |
| 8-ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALIDACIÓN .....  | 45 |
| 9-APLICACIÓN .....                              | 50 |
| 10-CONCLUSIONES .....                           | 57 |
| 11-LÍNEAS DE FUTURO.....                        | 59 |
| 12-BIBLIOGRAFÍA .....                           | 60 |



## 1-ANTECEDENTES

Larga es ya la experiencia del grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Pública de Navarra en materias de termoelectricidad, y más específicamente, en su rama de refrigeración termoelectrica, tal y como lo demuestran la extensa serie de proyectos de investigación y artículos publicados que han surgido desde hace más de diez años. A lo largo de todo este tiempo se han desarrollado experimentalmente equipos y componentes basados en la tecnología termoelectrica; junto a estos, se han ido creando distintos modelos matemáticos que simulan el comportamiento de estos equipos y componentes, comenzando en el año 1989 con la implementación del modelo AERO de cálculo computacional, hasta los modelos basados en diferencias finitas en la actualidad.

En el año 2005, aprovechando toda la experiencia en refrigeración termoelectrica y en simulación computacional, se decidió abrir una nueva línea de investigación correspondiente a la otra vertiente de la tecnología termoelectrica: **la generación de energía eléctrica**. En relación con esto, aparece en mayo de 2005, el primer estudio sobre generación termoelectrica del grupo: *“Modelo computacional para generación termoelectrica a través de placas solares fotovoltaicas”*. Este trabajo consistía en la creación y validación de un modelo de cálculo que simulara la generación de potencia eléctrica a través de varios módulos termoelectricos, aprovechando flujos de calor residual procedentes de placas solares fotovoltaicas.

Pero el hito fundamental en este campo queda enmarcado en el año 2007 con el diseño y desarrollo de un modelo computacional de generación termoelectrica [1] capaz de simular satisfactoriamente cualquier generador termoelectrico, y que ha estructurado la base de todos los proyectos desarrollados posteriormente dentro de esta línea de investigación.

En la actualidad puede observarse la gran cantidad de pérdidas de energía en forma de calor en la industria, con su correspondiente descenso de la eficiencia energética de los equipos que esto acarrea. Por ello, el mero hecho de aprovechar esas pérdidas para generar energía eléctrica mediante módulos termoelectricos, supone un gran avance de cara a la crisis energética y al desarrollo sostenible (**aprovechamiento calor residual**). Si, además, dicha energía es empleada para favorecer la refrigeración de equipos, se mejorará el rendimiento de éstos y se obtendrá un ahorro económico (**refrigeración gratuita**).

Gracias a estas ideas y al modelo computacional antes mencionado, el grupo de investigación de Ingeniería Térmica y de Fluidos centra su estudio sobre generación termoelectrica en estas dos importantes líneas de investigación:

-Aprovechamiento de flujos de calor residual: Empleo de calor de gases de escape procedentes de calderas domésticas e industriales para producir energía eléctrica, lo que ha proporcionado resultados de tal relevancia que se ha realizado una ponencia en un congreso internacional de termoelectricidad y dos publicaciones en revistas internacionales sobre esta prometedora línea de investigación.

-Auto-refrigeración: Objeto de estudio que comenzó en 2009 y se continúa en el presente proyecto.

El concepto de la auto-refrigeración se basa en el aprovechamiento del calor que tiene un dispositivo cualquiera y que, a su vez, necesite refrigeración para su funcionamiento, para producir energía eléctrica mediante la termoelectricidad. Dicha energía eléctrica se emplea en la refrigeración del dispositivo, de ahí la denominación de auto-refrigeración. De una manera más particular y concisa, se ideó transformar el calor procedente de un dispositivo en la energía eléctrica suficiente para alimentar un ventilador que lo refrigere mediante convección forzada. Así se consigue mejorar la refrigeración del equipo sin aporte extra de energía. Cabe destacar que apenas existen referencias en la bibliografía que aporten conocimiento al campo de la auto-refrigeración; todas las existentes se centran en la refrigeración de equipos informáticos portátiles y ninguna de ellas incluye la posibilidad de aplicación a equipos de mayores dimensiones y más complejos [2] [3].

En un primer proyecto de carácter completamente experimental, se demostraron las posibilidades existentes de la auto-refrigeración [4]. Así, dentro del marco de este trabajo titulado *“Estudio de la auto-refrigeración de convertidores de potencia mediante sistemas termoelectricos”*, se construye un prototipo para comparar la eficacia de métodos convencionales de refrigeración frente al nuevo concepto de auto-refrigeración. Los resultados obtenidos no pudieron ser más satisfactorios.

El proyecto fin de carrera aquí introducido ahonda en esta novedosa línea de investigación debido a la necesidad de poseer un modelo de cálculo computacional validado y consistente, capaz de simular de la manera más fiable posible cualquier aplicación de auto-refrigeración.

La consecución de este objetivo representaría un avance importante dentro del grupo de investigación ya que permitiría la evaluación rápida y fiable de las posibilidades existentes en aplicaciones reales, con las innegables ventajas que aportaría tanto económicamente como ecológicamente a niveles académicos e industriales.

## 2-OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA

### 2.1 Objeto general del proyecto

El propósito de este proyecto es poder demostrar la capacidad de auto-refrigeración termoeléctrica de equipos que generan flujos de calor, mediante el diseño y la validación de un modelo computacional que permita estudiar y evaluar aplicaciones prácticas de esta tecnología en la industria.

### 2.2 Objetivos específicos del proyecto

Después de haber descrito el objeto principal del proyecto de investigación, pueden enumerarse los objetivos específicos del proyecto:

- Recopilación de información relacionada con el proyecto de investigación.
- Revisión y adaptación del modelo computacional general de generación termoeléctrica para simular las posibles aplicaciones de auto-refrigeración.
- Experimentación del prototipo existente para la obtención de los datos necesarios para realizar la validación del modelo.
- Estudio estadístico analizando los valores obtenidos experimentalmente y computacionalmente.
- Estudio de una aplicación real.

### 2.3 Metodología del proyecto

Para completar el objetivo principal que consiste en diseñar y realizar una posterior validación del modelo computacional se siguen dos caminos paralelos: la vía computacional y la vía experimental. En esta primera (capítulos 5 y 6) se completará la implementación informática del modelo y se obtendrán los datos computacionales.

Sin embargo, en la vía experimental (Capítulo 7), se experimentará el prototipo en la cámara frigorífica para obtener los resultados experimentales que, posteriormente, se analizarán estadísticamente según la técnica de diseño de experimentos para poder compararlos con los resultados computacionales.

A pesar de que a simple vista puedan parecer dos vías completamente independientes, es necesario realizar unos ensayos previos en los cuales se determinan ciertos parámetros necesarios para el modelo computacional que dependen de las condiciones ambientales del lugar de ensayo, en este caso la cámara frigorífica.

Una vez recopilados todos los datos se realizará, en el capítulo 8, la validación estadística alcanzando así el objetivo fijado.

Por último, ya en el capítulo 9, se presentará una aplicación estudiada en la cuál es viable la implantación de un elemento que realice la auto-refrigeración, seguidos de los apartados de conclusión (Capítulo 10) y líneas de futuro (Capítulo 11).

## **2.4 Estructura del proyecto**

Los objetivos específicos del proyecto son los que van a marcar el desarrollo del mismo. De esta forma, la estructura del proyecto será la siguiente:

- Antecedentes y objetivos: aspectos iniciales del proyecto.
- Introducción: apartado donde se desarrollan todos los aspectos introductorios sobre termoelectricidad y transmisión de calor.
- Implementación computacional del modelo: adaptación del modelo general de generación termoelectrica, y análisis e introducción de nuevos parámetro que permitan ahorrar costes computacionales y facilitar su uso.
- Estudio computacional: Se realizará un estudio teórico sobre la posibilidad de la auto-refrigeración mediante el modelo computacional ya nombrado.
- Estudio experimental del prototipo: realización de diversos ensayos en diferentes condiciones del prototipo existente.
- Validación estadística del modelo computacional: análisis de los datos obtenidos experimentalmente mediante la herramienta de diseño de experimentos y contraste con los datos computacionales.
- Aplicación del modelo: estudio de la viabilidad de la auto-refrigeración en una aplicación industrial.
- Análisis de los resultados, conclusión y posibles líneas de futuro.

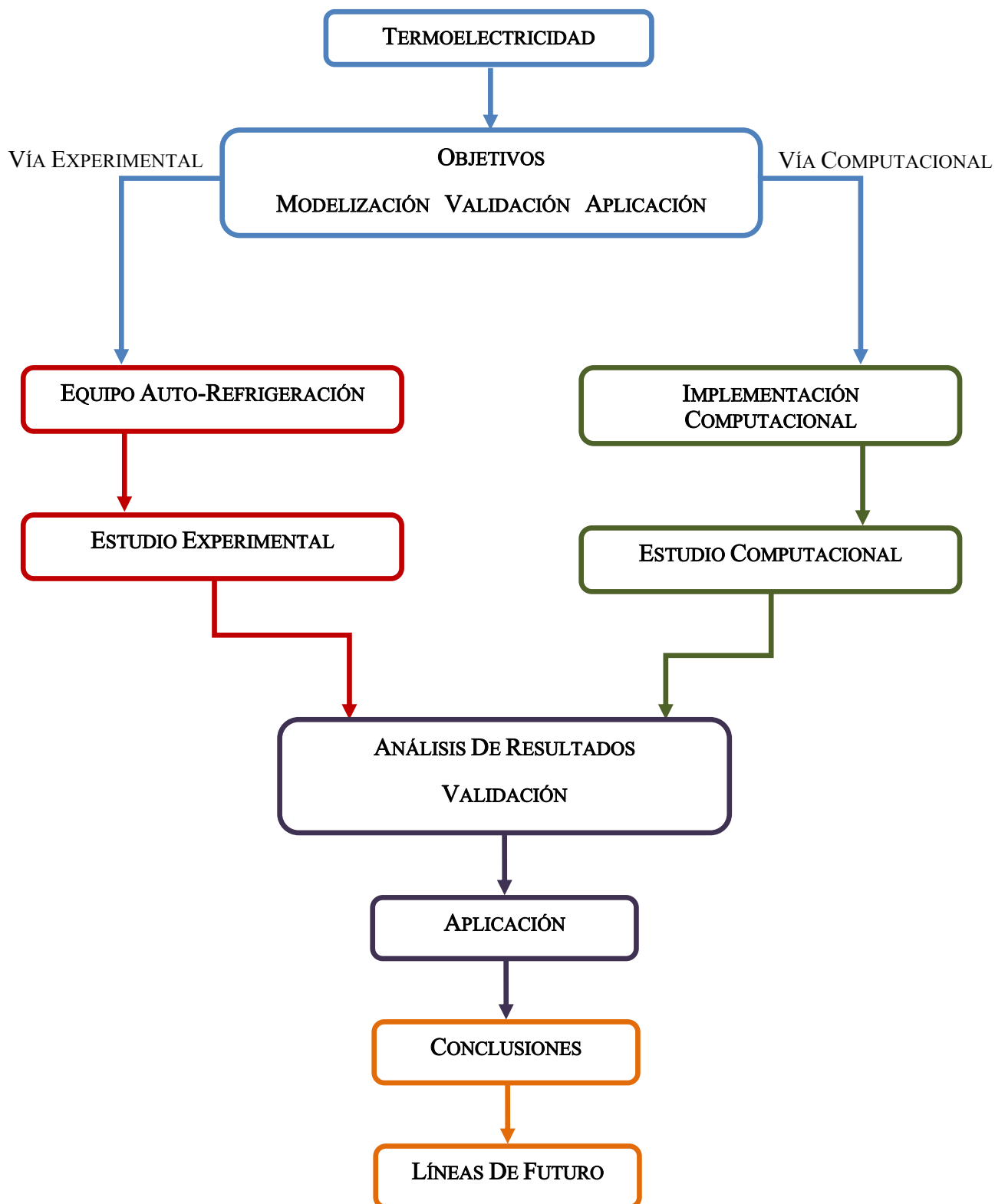


Figura 2.1-Esquema de la estructura del proyecto

## 3-INTRODUCCIÓN A LA TERMOELECTRICIDAD

### 3.1 Historia de la termoelectricidad

La termoelectricidad se considera como la rama de la termodinámica superpuesta a la electricidad, donde se estudian los fenómenos en los que intervienen el calor y la electricidad. El fenómeno más conocido es el de la generación de electricidad por la aplicación de calor a la unión de dos materiales diferentes: si se unen por ambos extremos dos alambres de distinto material (este circuito se denomina termopar), y una de las uniones se mantiene a una temperatura superior a la otra, surge una diferencia de tensión que hace fluir una corriente eléctrica entre las uniones caliente y fría. Este fenómeno fue observado por primera vez en 1821 por el físico alemán Thomas Seebeck, (1770-1831) y se conoce como efecto Seebeck.

Cuando se hace pasar una corriente por un circuito compuesto de materiales diferentes cuyas uniones están a la misma temperatura, se produce el efecto inverso; en este caso, se absorbe calor en una unión y se desprende en la otra. Este fenómeno se conoce como efecto Peltier en honor al físico francés Jean Peltier (1785-1845), que lo descubrió en 1833. Es posible usar sistemas de semiconductores basados en el efecto Peltier como refrigeradores para aplicaciones especiales.

Aunque se considera como descubridor del efecto termoelectrico a Seebeck, al revisar los estudios del físico italiano Alessandro Volta (1735-1827) se ha constatado que, en sus trabajos pioneros sobre electricidad, midió diferencias de potencial debidas a la termoelectricidad al usar contactos entre diversos metales. Sin embargo no prestó demasiada atención a dicho efecto. Junto a Alessandro Volta, el investigador que merece una reseña histórica aparte es William Thomson (1823-1907). También conocido como Lord Kelvin, este matemático y físico británico es considerado como uno de los más importantes profesores de su época. En el campo de la termodinámica, Kelvin desarrolló el trabajo realizado por James Prescott Joule sobre la interrelación del calor y la energía mecánica y en 1852 ambos colaboraron para investigar el fenómeno que se conoció como efecto Joule-Thomson. Dedujo también las llamadas *Relaciones de Kelvin*, que permiten interpretar conjuntamente los coeficientes Seebeck, Peltier y Thomson.

El aprovechamiento de los fenómenos termoelectrónicos empezó a ser factible a partir de los estudios de Telkes en los años treinta y de Ioffe en los años cincuenta. Telkes utilizó pares o soldaduras de *Pb-S* y *Zn-Sb* e Ioffe descubrió el uso de *Pb-Te* y *Pb-Se*. Desde entonces,

los telurios y seleniuros han sido muy utilizados y para generación termoelectrica (conversión de energía calorífica en energía eléctrica) se alcanzan rendimientos aceptables.

En la actualidad la termoelectricidad ha avanzado enormemente y hoy en día la mayoría de la gente ha oído hablar de este fenómeno o al menos ha visto alguna aplicación en el mercado como, por ejemplo, las pequeñas neveras termoelectricas. Sin embargo, las aplicaciones de los refrigeradores y generadores termoelectricos de alta capacidad no están extendidas debido a la limitación que impone su baja eficiencia.

En los últimos años, debido a la creciente conciencia medioambiental que la sociedad demanda, se han tenido que buscar métodos alternativos de generación eléctrica, y los dispositivos de generación termoelectrica han emergido con fuerza. La investigación actual en este campo se divide en dos ramas: generación de baja potencia, para sustituir a pequeñas baterías que forman parte de sensores, controladores, contadores, etc; y generación de alta potencia.

En relación con este último caso, el elevado coste de la energía y las regulaciones medioambientales que afectan actualmente a la industria hacen que el interés en esta área esté aumentando rápidamente. Además, se ha constatado que en situaciones donde la fuente de calor es gratis o de bajo coste, como en el caso del calor residual, la eficiencia de los módulos termoelectricos no es un problema primordial. Lógicamente, aunque la eficiencia del sistema de generación termoelectrica sea muy pequeña, es siempre mejor generar energía eléctrica a partir de una fuente de calor que no se aprovecha en absoluto que desechar esta fuente completamente, siempre y cuando exista una viabilidad económica [5].

## 3.2 Teoría básica

A continuación se describen brevemente las ecuaciones que gobiernan los fenómenos termoelectricos: efectos Joule, Seebeck, Peltier y Thomson.

### 3.2.1 - Efecto Joule

La más conocida interacción entre un fenómeno eléctrico (la conducción de corriente eléctrica) y su fenómeno térmico asociado (el calentamiento del conductor por el que circula la corriente) es el efecto Joule. La materia ofrece cierta “resistencia” al movimiento de los



electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor:

$$\dot{Q}_{Joule} = R_0 * I^2 \quad (3.1)$$

$\dot{Q}_{Joule}$  = Flujo de calor producido por efecto Joule.

$R_0$  = Resistencia eléctrica.

$I$  = Intensidad de corriente que circula.

### 3.2.2 - Efecto Seebeck

Thomas J. Seebeck descubrió que en un circuito formado por dos metales distintos homogéneos, A y B, con dos uniones a diferente temperatura,  $T$  y  $T+\Delta T$ , aparece una corriente eléctrica  $J$ , o bien, si se abre el circuito, una fuerza termo-electromotriz (f.t.e.m.)  $E_{AB}$  que depende de los metales utilizados en la unión y de la diferencia de temperatura entre las dos uniones (figura 3.1).

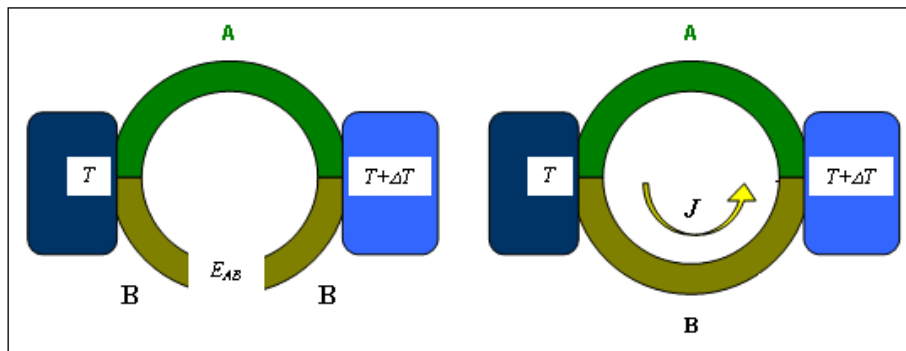


Figura 3.1 - Esquema de un par termoelectrónico

La relación entre la f.t.e.m.,  $E_{AB}$ , y la diferencia de temperaturas entre las uniones,  $\Delta T$ , define el coeficiente Seebeck,  $\alpha_{AB}$ :

$$\alpha_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} = \alpha_A - \alpha_B \quad (3.2)$$

$\alpha_A$  y  $\alpha_B$ : Potencias termoelectrificas absolutas de los materiales A y B, dependientes de la temperatura  $T$ .

## 3.2.3 - Efecto Peltier

El efecto Peltier consiste en el enfriamiento o calentamiento de una unión entre dos conductores distintos al pasar una corriente eléctrica por ella. Este enfriamiento o calentamiento depende exclusivamente de la composición de los materiales y de la temperatura de la unión. La potencia calorífica intercambiada en la unión entre A y B es:

$$\dot{Q}_{Peltier} = \pm \pi_{AB} I = \pm IT(\alpha_B - \alpha_A) \quad (3.3)$$

El término  $\pi_{AB}$  es el llamado coeficiente Peltier, que se define como el calor intercambiado en la unión por unidad de tiempo y de corriente que circula a través de la misma. Su fórmula general es la siguiente:

$$\pi_{AB} = \frac{\dot{Q}_{Peltier}}{\int_S J dS} = T(\alpha_B - \alpha_A) \quad (3.4)$$

$J$  = Densidad de corriente eléctrica

$S$  = Superficie

$T$  = Temperatura absoluta

$\alpha_A, \alpha_B$  = Coeficiente Seebeck de los materiales A y B

## 3.2.4 - Efecto Thomson

El efecto Thomson consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico homogéneo con una distribución de temperaturas no homogénea, por el que circula una corriente.

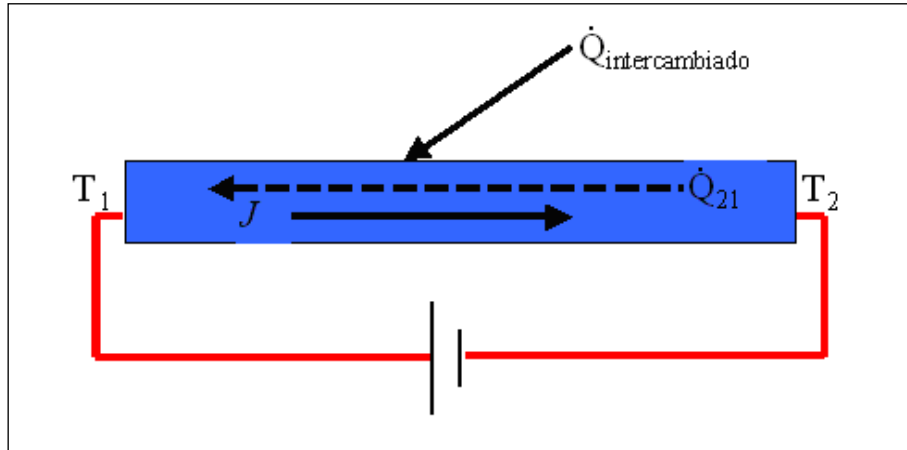


Figura 3.2 - Esquema de un conductor sometido a un gradiente de temperatura, circulando a través de él una corriente eléctrica

$$q_{Thomson}^* = \sigma^* \nabla T^* J \quad (3.5)$$

$q_{Thomson}^*$  = Flujo de calor por unidad de volumen generado por efecto Thomson.

$\sigma$  = Coeficiente Thomson.

$\nabla T$  = Gradiente de temperatura en el conductor.

$J$  = Densidad de corriente eléctrica.

Desarrollando esta expresión para obtener la relación entre el coeficiente Thomson y Seebeck y teniendo en cuenta las ecuaciones que rigen los efectos Peltier y Seebeck, se llega a:

$$\sigma^* \equiv \frac{q_{Thomson}^*}{\nabla T \cdot J} = -T \frac{\partial \alpha}{\partial T} \quad (3.6)$$

Obteniéndose para la unión:

$$\sigma_A - \sigma_B = -T \frac{\partial \alpha_A}{\partial T} + T \frac{\partial \alpha_B}{\partial T} = T \frac{\partial}{\partial T} (\alpha_B - \alpha_A) \quad (3.7)$$

## 3.2.5 - Interacción termoelectrica y ecuaciones de Kelvin.

Considerando el circuito de la figura 3.1, formado por dos conductores  $A$  y  $B$  con uniones firmes en sus extremos a temperaturas  $T$  y  $T+\Delta T$ , se establece una corriente eléctrica entre ambas uniones (efecto Seebeck). Para el caso en el cual la corriente que circula es suficientemente pequeña, tal que se puede despreciar la generación de calor por efecto Joule y que no se considera la conducción térmica (efecto Fourier), Lord Kelvin dedujo las relaciones de interacción termoelectrica que llevan su nombre, aplicando el primer principio de la termodinámica y el segundo principio para procesos reversibles. Estas relaciones son válidas para los efectos reversibles, sin embargo dichos efectos están íntimamente ligados a los efectos irreversibles: efecto Joule y efecto Fourier [6].

- Primera relación de Kelvin:

$$\sigma_A - \sigma_B = -T \frac{\partial^2 E_{AB}}{\partial T^2} \quad (3.8)$$

- Segunda relación de Kelvin:

$$\pi_{AB} = T \frac{\partial E_{AB}}{\partial T} \quad (3.9)$$

## 3.3 – Funcionamiento de un módulo Peltier como generador termoelectrico

## 3.3.1 - Funcionamiento de un elemento termoelectrico simple

Un elemento termoelectrico simple se compone de dos pequeñas piezas semiconductoras, una del tipo  $n$  y la otra del tipo  $p$ , unidas en uno de sus extremos mediante una unión metálica o soldadura (figura 3.3). Se considera que este elemento tiene las siguientes características:

- Estos materiales son homogéneos.

- Están aislados eléctricamente de sus alrededores; térmicamente también lo están, excepto en la unión metálica, donde hay intercambio de flujos de calor.

- Las variables siguientes dependen de la temperatura:

$\alpha$  = Coeficiente Seebeck

$k$  = Conductividad térmica

$\rho_e$  = Resistividad eléctrica

$\sigma$  = Coeficiente Thomson

- Los subíndices  $p, n$  se refieren al semiconductor tipo  $p$  y al semiconductor tipo  $n$  respectivamente.

- Los subíndices  $h, c$  se refieren al extremo caliente (hot) y al extremo frío (cold) de cada semiconductor.

Si esta unión se mantiene a una temperatura constante  $T_h$  mientras que los otros extremos de los semiconductores se mantienen a una temperatura más fría  $T_c$ , se produce una pequeña fuerza electromotriz  $Et$  de valor:

$$Et = (\alpha_{ph} - \alpha_{nh}) * T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc}) * T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c) \quad (3.10)$$

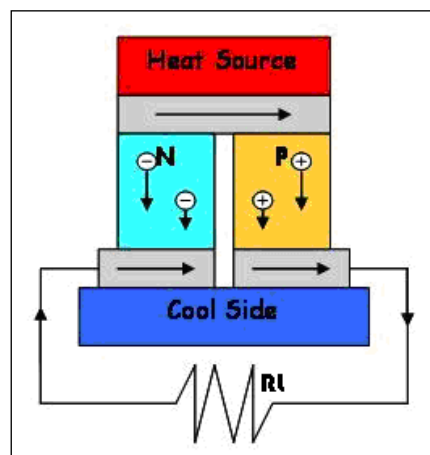


Figura 3.3 - Esquema de un elemento termoeléctrico simple

Para mantener el extremo caliente a una temperatura  $T_h$ , es necesario que, desde una fuente de calor externa, llegue constantemente a este extremo un flujo de calor  $\dot{Q}_h^*$ . Además, desde el extremo frío, existe una pérdida de calor  $\dot{Q}_c^*$  hacia el exterior del conjunto.

Si se cierra el circuito mediante una resistencia de carga  $R_L$ , aplicando la teoría básica de circuitos, se puede dibujar una analogía eléctrica de la siguiente forma (figura 3.4):

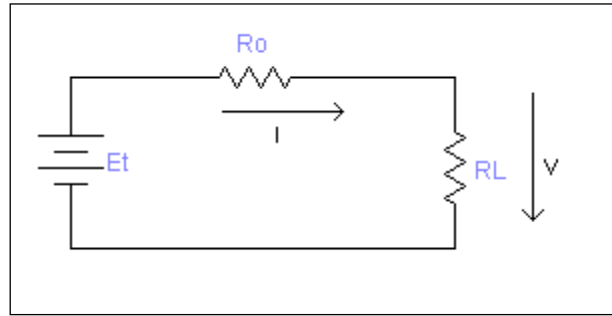


Figura 3.4 - Analogía eléctrica de un elemento termoeléctrico simple.

$R_L$  = Resistencia de carga.

$V$  = Diferencia de potencial en la resistencia de carga  $R_L$ .

$I$  = Corriente eléctrica que circula por el circuito.

$R_0$  = Resistencia eléctrica propia del elemento termoeléctrico.

$R_0$  está formada por la resistencia eléctrica del semiconductor  $n$ , más la resistencia eléctrica del semiconductor  $p$  y más la resistencia eléctrica de los cuatro contactos semiconductor-material de unión. Los dos primeros términos son fáciles de deducir; el último es más complejo porque no se refiere a la resistencia eléctrica del material de unión sino a la resistencia eléctrica que se opone al paso de la corriente desde el material semiconductor al material conductor:

$$R_0 = R_p + R_n + R_{\text{contactos}} = \rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} + 2 * \frac{\rho_{\text{contacto},p}^{\text{superficial}}}{A_p} + 2 * \frac{\rho_{\text{contacto},n}^{\text{superficial}}}{A_n} \quad (3.11)$$

$L$  = Longitud de cada semiconductor.

$A$  = Área transversal de cada semiconductor.

$\rho_e$  = Resistividad eléctrica de cada semiconductor.

$\rho_{\text{contacto}}^{\text{superficial}}$  = Resistividad eléctrica superficial de cada unión semiconductor-material de unión.

Sea el factor adimensional  $m=R_L/R_0$ , aplicando la teoría básica de circuitos, se puede deducir el valor de la diferencia de potencial  $V$ , la intensidad de corriente  $I$  y la potencia consumida por la resistencia de carga  $P$ :

$$V = Et * \frac{R_L}{R_L + R_0} = [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})(T_h) - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})(T_c) + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] * \frac{m}{m+1} \quad (3.12)$$

$$I = Et * \frac{1}{R_L + R_0} = [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})(T_h) - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})(T_c) + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] * \frac{1}{R_0(m+1)} \quad (3.13)$$

$$P = Et^2 * \frac{R_L}{(R_L + R_0)^2} = [(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})(T_h) - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})(T_c) + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)]^2 * \frac{m}{R_0(m+1)^2} \quad (3.14)$$

Aplicando el primer principio de la termodinámica al conjunto, se obtiene:

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c + P \quad (3.15)$$

Debido al efecto Peltier, al pasar la corriente generada por el circuito, se produce una absorción de calor en la unión que está a temperatura más alta, de valor:

$$\dot{Q}_{Peltier,h} = (\alpha_{ph} - \alpha_{nh}) T_h I \quad (3.16)$$

En la otra unión se produce una cesión de calor de valor:

$$\dot{Q}_{Peltier,c} = (\alpha_{pc} - \alpha_{nc}) T_c I \quad (3.17)$$

La producción de calor por efecto Joule es:

$$\dot{Q}_{Joule} = I^2 R_0 \quad (3.18)$$

Estas pérdidas por efecto Joule están compuestas por las pérdidas de calor por efecto Joule en los semiconductores:

$$\dot{Q}_{Joule,n,p} = I^2 \left( \rho_p \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \frac{L_n}{A_n} \right) \quad (3.19)$$

Y las pérdidas de calor por efecto Joule en las uniones de la cara caliente y de la cara fría respectivamente:

$$\dot{Q}_{Contact,h} = I^2 * \left( \frac{\rho_{contact,p}^{superficial}}{A_p} + \frac{\rho_{contact,n}^{superficial}}{A_n} \right) \quad (3.20)$$

$$\dot{Q}_{Contact,c} = I^2 * \left( \frac{\rho_{contact,p}^{superficial}}{A_p} + \frac{\rho_{contact,n}^{superficial}}{A_n} \right) \quad (3.21)$$

Debido al efecto Thomson, aparece una generación o absorción de calor en los semiconductores. Como se observa en la figura 3.3, en el semiconductor  $p$  el gradiente de temperatura y la intensidad de corriente tienen sentidos contrarios. Por eso, si el coeficiente Thomson  $\sigma_p$  es positivo, en el semiconductor  $p$  se absorbe un flujo de calor:

$$\dot{Q}_{Thomson,p} = \sigma_p (T_h - T_c) * I \quad (3.22)$$

Por otro lado, en el semiconductor  $n$ , el gradiente de temperatura y la intensidad de corriente tienen el mismo sentido, por lo que si el coeficiente Thomson  $\sigma_n$  es positivo, se genera una cantidad de calor por efecto Thomson:

$$\dot{Q}_{Thomson,n} = \sigma_n (T_h - T_c) * I \quad (3.23)$$

La generación de calor global por efecto Thomson se obtiene sumando ambas ecuaciones:

$$\dot{Q}_{Thomson} = (\sigma_n - \sigma_p) (T_h - T_c) * I \quad (3.24)$$

Por último, la diferencia de temperatura entre los extremos del elemento termoeléctrico simple  $(T_h - T_c)$  provoca una transmisión de calor desde la parte caliente hacia la fría, cuyo valor se obtiene de la ecuación general de transmisión de calor:



$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = k \left( \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) + q^* \quad (3.25)$$

### 3.3.2 - Funcionamiento de un módulo Peltier como generador eléctrico

Un módulo Peltier está compuesto por  $N$  elementos termoeléctricos simples iguales, conectados eléctricamente en serie mediante uniones hechas de un material conductor, y conectados térmicamente en paralelo. Estos elementos y sus conectores están montados entre dos sustratos de material cerámico que dan firmeza mecánica al conjunto y aíslan eléctricamente todo el circuito interno (Figura 3.5).

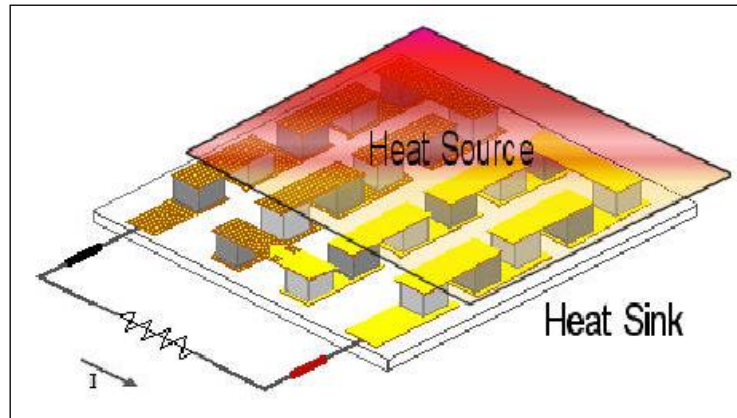


Fig. 3.5 - Esquema de un modulo Peltier como generador termoeléctrico.

Tomando como referencia el estudio de un elemento termoeléctrico simple desarrollado en el apartado anterior, se va a explicar el funcionamiento de un módulo Peltier como generador termoeléctrico. En la mayoría de los módulos Peltier comerciales se dan una serie de relaciones entre sus elementos que permiten simplificar todas las ecuaciones detalladas en el apartado anterior. Estas relaciones son:

-Es común que los semiconductores  $p$  y  $n$  tengan exactamente la misma longitud  $L$  y la misma área transversal  $A$ .

$$L_p = L_n = L$$

$$A_p = A_n = A$$

-El material de unión es el mismo en los extremos calientes y en los fríos, por lo que su resistividad eléctrica superficial es la misma:

$$\rho_{contacto,p}^{superficial} = \rho_{contacto,n}^{superficial} = \rho_{contacto}^{superficial}$$

Con estas relaciones simplificadoras, las ecuaciones que explican el funcionamiento de un módulo Peltier convencional como generador termoeléctrico, quedan de la siguiente forma:

*Nota: Estas son las relaciones que se utilizan en el modelo de cálculo matemático que se utiliza en este proyecto.*

-Fuerza electromotriz generada y resistencia eléctrica interna de cada módulo:

$$E_t = 2 * N * [\alpha_h T_h - \alpha_c T_c + \sigma(T_h - T_c)] \quad (3.26)$$

$$R_0 = 2 * N * (\rho_e \frac{L}{A} + 2 * \frac{\rho_{contacto}^{superficial}}{A}) \quad (3.27)$$

-Intensidad que circula por el circuito, diferencia de potencial en la resistencia de carga y potencia generada en ella:

$$V = N[(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \frac{m}{m+1} \quad (3.28)$$

$$I = N[(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)] \frac{1}{R_0(m+1)} \quad (3.29)$$

$$P = N^2[(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h - (\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c + (\sigma_p - \sigma_n)(T_h - T_c)]^2 \frac{m}{R_0(m+1)^2} \quad (3.30)$$

-Calor absorbido en el lado caliente, por efecto Peltier:

$$\dot{Q}_{Peltier,h} = N[(\alpha_{ph} - \alpha_{nh})T_h I] \quad (3.31)$$

-Calor generado en el lado frío, por efecto Peltier:

$$\dot{Q}_{Peltier,c} = N[(\alpha_{pc} - \alpha_{nc})T_c I] \quad (3.32)$$

-Generación de calor por efecto Joule en los semiconductores:

$$\dot{Q}_{Joule,n,p} = N I^2 (\rho_p + \rho_n) \frac{L}{A} \quad (3.33)$$

-Generación de calor por efecto Joule en las uniones entre semiconductores:

$$\dot{Q}_{Contactqh} = 2N I^2 \frac{\rho_{contacto}^{superficial}}{A} \quad (3.34)$$

$$\dot{Q}_{Contactqc} = 2N I^2 \frac{\rho_{contacto}^{superficial}}{A} \quad (3.35)$$

-Calor generado por efecto Thomson en los semiconductores:

$$\dot{Q}_{Thomson} = N(\sigma_n - \sigma_p)(T_h - T_c)I \quad (3.36)$$

-Por último, la diferencia de temperatura entre caras ( $T_h - T_c$ ), provoca una transmisión de calor desde la parte caliente hacia la fría, cuyo valor se obtiene solucionando la ecuación general de transmisión de calor (ecuación 3.25).

### 3.4 - MODELOS MATEMÁTICOS DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA

Los dispositivos de generación termoelectrónica se componen básicamente de uno o varios módulos termoelectrónicos dispuestos en diferentes configuraciones (normalmente en paralelo térmicamente y en serie eléctricamente) conectados de tal manera que una cara de cada uno de los módulos se encuentra en contacto con un foco frío y la otra cara de cada módulo se encuentra en contacto con un foco caliente. Esta configuración básica hace que, en su funcionamiento, se vean implicados conjuntamente fenómenos relativos a la transmisión de calor y a la termoelectricidad. De cada uno de esos fenómenos se conocen las expresiones que describen su funcionamiento: se conocen las leyes fundamentales de la conducción del calor, de la convección tanto natural como forzada, así como las expresiones para los efectos termoelectrónicos Seebeck, Peltier, Joule y Thomson. El problema que se presenta es cómo resolver todas estas ecuaciones a la vez para poder estudiar el funcionamiento de un generador termoelectrónico completo.

#### 3.4.1 - Solución analítica

La primera opción es intentar encontrar una solución analítica que explique el comportamiento global de todo el sistema. Esta es una solución bastante complicada de encontrar porque para ello se deben resolver todas estas expresiones térmicas y termoelectrónicas de manera simultánea. Una posibilidad para resolver de manera analítica el sistema de ecuaciones planteado es aplicar hipótesis simplificativas que reduzcan la complejidad del mismo. El problema de esto es que estas hipótesis resultan ser unas simplificaciones demasiado importantes y el resultado que se obtiene suele estar normalmente muy alejado de la realidad.

Dentro de este grupo de sistemas de resolución se encuentra el modelo del par ideal que es uno de los más utilizados en el estudio y optimización de los módulos Peltier. Su expresión general fue descubierta por Ioffe en los años cincuenta, y permite resolver el sistema de ecuaciones bajo las siguientes hipótesis simplificativas:

- Las propiedades termoelectrónicas son independientes de la temperatura y, por tanto, se desprecia el efecto Thomson.
- El flujo eléctrico y el flujo de calor son unidimensionales.

- Se desprecian los efectos térmicos y eléctricos de los materiales de unión entre semiconductores y los de los materiales cerámicos.

Este modelo proporciona soluciones bastante aproximadas a la solución real cuando el salto de temperatura entre las caras del módulo es muy pequeño. Cuando se tienen un salto entre caras de mayor valor, la influencia de la temperatura sobre las propiedades termoeléctricas se hace más significativa y el funcionamiento de este método empeora notablemente. Soluciones analíticas posteriores que han ido surgiendo con el paso del tiempo han intentado solucionar los problemas que presentaba el modelo de par ideal, consiguiéndose modelos cada vez más complejos que requerían la mayoría de las veces de más variables de entrada para resolver el sistema de ecuaciones.

### 3.4.2 - Solución mediante métodos numéricos

Los métodos de resolución numérica intentan resolver el problema planteado desde otro punto de vista: así, mientras el método analítico intenta encontrar una solución real para una aproximación del problema original, los métodos de resolución numérica buscan obtener soluciones aproximadas para el problema original. Varios son los métodos de resolución numérica que se usan en la actualidad:

El primero de ellos es el método de elementos finitos (*MEF*). Esta es una herramienta que resuelve por computadora una infinidad de problemas numéricos con toda clase de condiciones de contorno. El mayor problema con el que se enfrenta el método de elementos finitos es la gran potencia de cálculo y el excesivo tiempo requeridos para resolver los problemas planteados, los cuales crecen rápidamente a medida que el método se aproxima más a la realidad y se introducen en la simulación más elementos reales. Por ello existen muy pocos estudios de sistemas termoeléctricos completos mediante elemento finitos.

Otro método conocido en el estudio de generadores termoeléctricos es el de la analogía eléctrica resuelta por ordenador, conocido por su acrónimo *AERO*. Como su nombre indica resuelve los fenómenos que tienen lugar en el módulo Peltier estableciendo la analogía con una red eléctrica, en la que se incluyen los fenómenos propios del mismo. La principal ventaja de este método frente a los elementos finitos radica en la rapidez de cálculo ya que en este método se resuelve un sistema de ecuaciones normal y en el *MEF* lo que se resuelve es un

sistema de ecuaciones diferenciales en la que además aparecen muchos más nodos. Su aplicación en la resolución de problemas relacionados con la termoelectricidad ofrece resultados satisfactorios, aunque presenta una gran dificultad a la hora de simular sistemas complejos.

Por último se presenta el método de diferencias finitas, que considero el más válido a la hora de resolver el sistema de ecuaciones de un generador termoeléctrico, ya que aúna una buena exactitud en los resultados con una considerable velocidad de cálculo. La idea principal de este método es la de obtener soluciones reales del problema original, pero solamente para un número finito de valores de las variables de entrada y no para todo el espectro continuo, lo cual provoca que se manejen un grupo pequeño de puntos de estudio, reduciéndose considerablemente los tiempos de computación. Aplicado a la generación termoeléctrica, se obtienen soluciones reales de la ecuación general de la transmisión del calor pero sólo para unos puntos en el espacio e intervalos de tiempo discretos. Permite resolver completamente el comportamiento del dispositivo termoeléctrico con menos hipótesis simplificadoras que los modelos analíticos y con un coste de tiempo computacional mucho menor que el usado por los modelos de elementos finitos.

## 4. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE AUTO-REFRIGERACIÓN

El sistema de estudio experimental escogido es un prototipo capaz de auto-refrigerarse ya existente, que se construyó para el proyecto fin de carrera [2].

El prototipo está integrado por los siguientes elementos:

- Soporte: Da estabilidad al prototipo y evita el contacto de la cara más caliente de la placa con la superficie de apoyo. Está compuesto por madera y cuatro tubos huecos de polietileno (PE).
- Placa: Fabricada en Aluminio y dividida en dos partes: superior e inferior. Sirve para alojar el foco de calor y dotarle de la mayor superficie posible para poder colocar los módulos termoelectricos. Sus dimensiones son 160mm x 160mm x 22mm. Se le ha mecanizado una muesca para poder introducir una sonda de temperatura
- Foco de calor: Elemento que simula el equipo que necesita refrigeración. En este caso se emplean dos resistencias eléctricas alimentadas por una fuente energía eléctrica en continua. Su elección se debe a su gran ventaja: puede controlarse en todo momento la potencia que disipan y por tanto su temperatura. Sin embargo, a pesar de que pueden alcanzarse elevadas potencias (hasta 200W cada una), la temperatura máxima de funcionamiento de las resistencias establece un límite superior de alrededor de 120 °C en funcionamiento continuo.

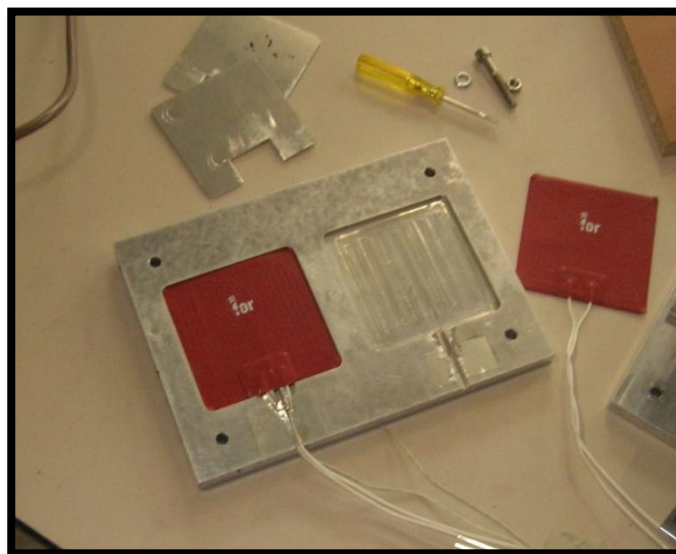


Figura 4.1-Placa inferior con resistencias eléctricas

○ Módulos termoeléctricos: Se colocan cuatro módulos modelo TGM-287-1.0-1.5 fabricados en Bismuto-Teluro, que pueden soportar una temperatura máxima de 225°C. La cara en contacto con la placa de aluminio se denominará *cara caliente del módulo* o *cerámico caliente*, y la que se encuentra en contacto con el heat extender *cara fría del módulo* o *cerámico frío*. Las dimensiones de cada módulo son de 40 mm x 40 mm x 3,8 mm, por lo que la superficie total es de 6400 mm<sup>2</sup>.

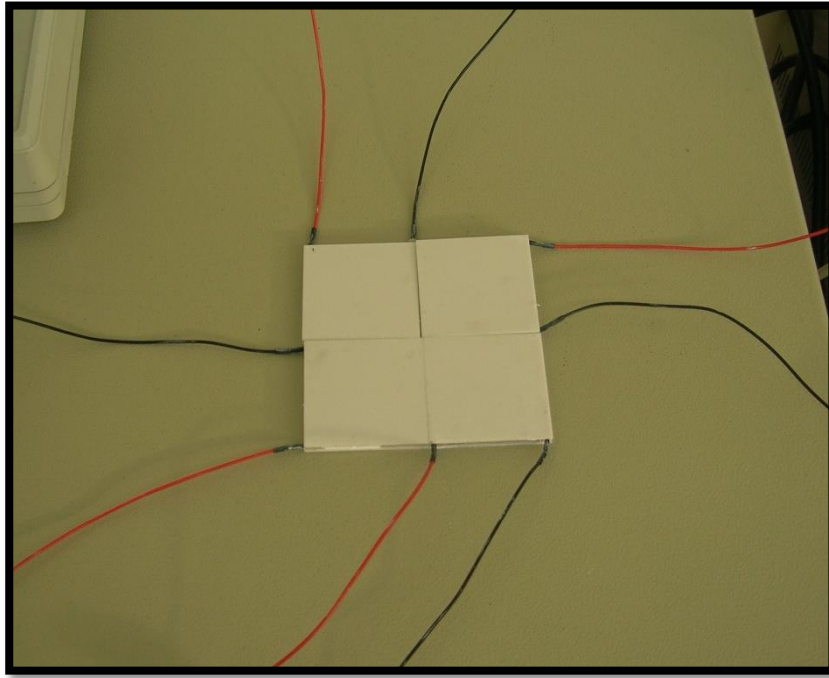
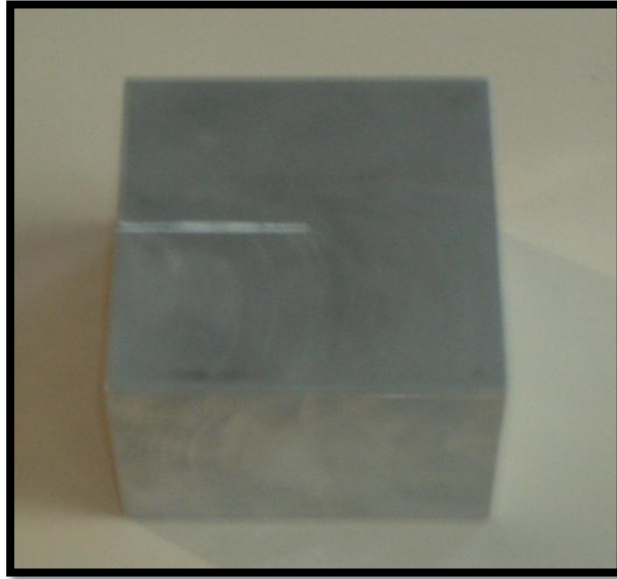


Figura 4.2-Módulos termoeléctricos

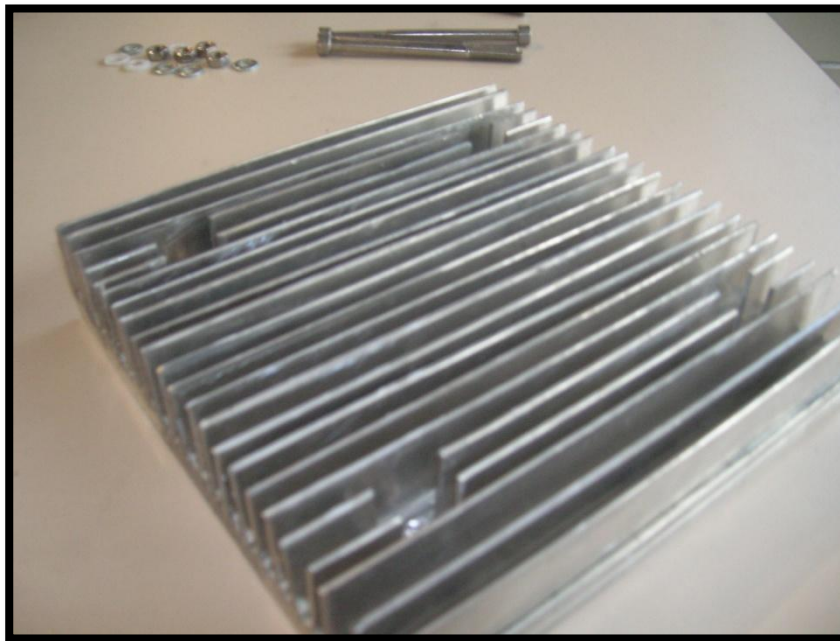
○ Heat extender: Taco de aluminio colocado entre los módulos termoeléctricos y el disipador de aletas. Su función es primordial, ya que se necesita que la mayor parte del flujo de calor se evacúe a través de los módulos. En caso de que no se colocara, el espesor de aire entre la placa y el disipador sería tan pequeño que aparecerían flujos de calor entre estos dos elementos que no atravesarían los módulos, con la consiguiente disminución en la eficiencia del conjunto. El taco asegura una separación suficiente para evitar la aparición de este efecto, conocido como puente térmico. Sus dimensiones son de 80 mm x 80 mm x 70 mm. Al igual que con la placa, se le mecanizó una ranura para la colocación de una sonda de temperatura.





**Figura 4.3-Heat extender**

○ Disipador de aletas: Para obtener una buena evacuación del calor de la cara fría de los módulos, se ha seleccionado un disipador de aletas de aluminio de dimensiones 155 mm x 155 mm x 12 mm. Dispone de orificios para los tornillos que unen la placa con el propio disipador, además de ranura inferior para alojar una sonda de temperatura.



**Figura 4.4-Disipador de aletas**

○ Ventilador: Para aprovechar la energía eléctrica producida y forzar la convección, se coloca un ventilador en la parte superior del disipador como se muestra en la Figura 4.6. Al necesitarse las curvas de funcionamiento del ventilador se ha empleado el modelo *SUNON KDE1208PTS1-6* cuya potencia máxima de alimentación es de 2,6 W y con una resistencia de carga de 60  $\Omega$ .

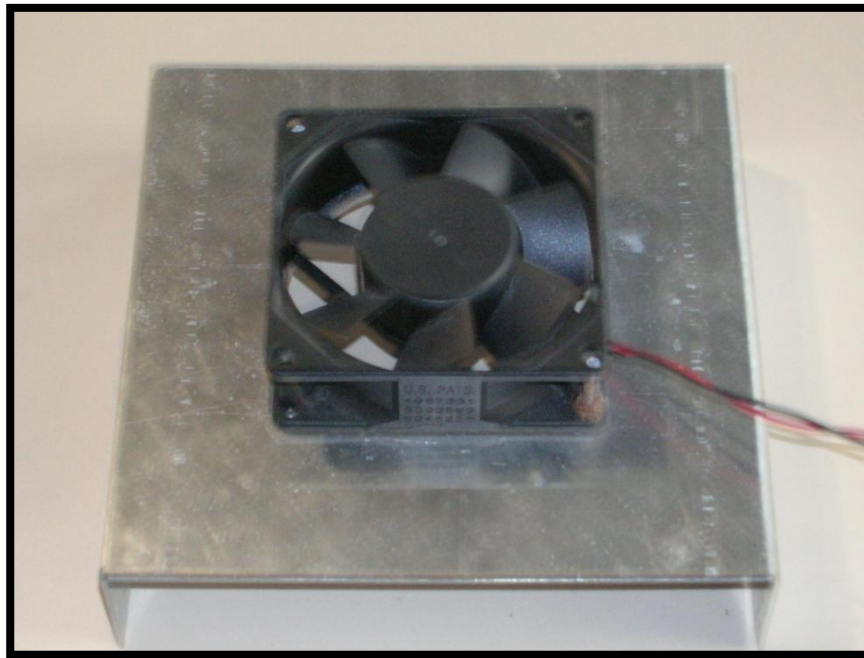


Figura 4.5-Ventilador

**Nota:** Todas las superficies de contacto entre los diferentes elementos han sido cubiertas con pasta conductora para evitar, en la medida de lo posible, problemas en la conducción de calor entre sólidos.

Todo ello se refleja esquemáticamente en la figura 4.6:

**Ventilador**

**Disipador de aletas**

**Heat extender**

**Módulos termoeléctricos**

**Placa superior**

**Foco de calor**

**Placa inferior**

**Soporte**

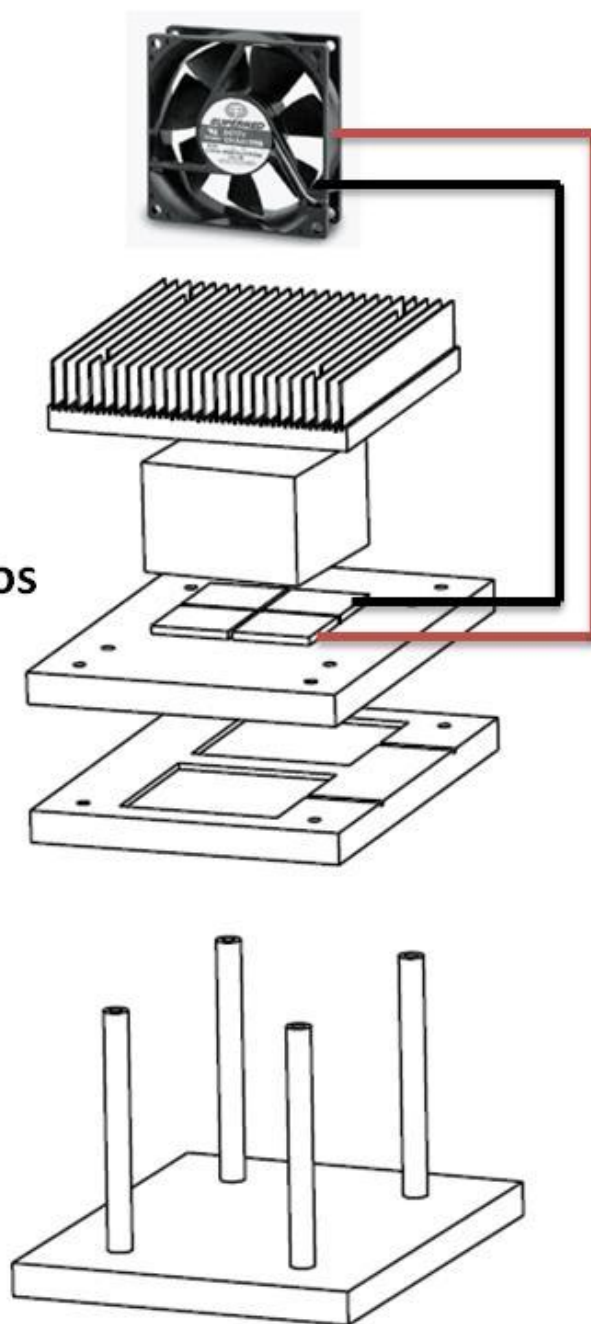


Figura 4.6-Eschema del prototipo empleado

## 5-IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

El punto de partida de esta fase del proyecto es el modelo computacional ya existente [1] el cual está implementado en el software matemático MatLab en lenguaje M.

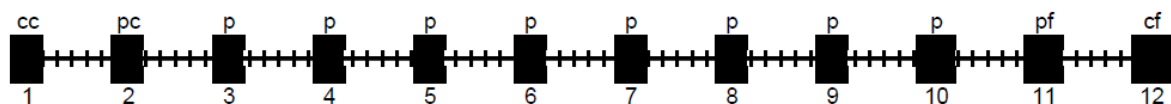
Dicho modelo utiliza el método de las diferencias finitas mediante el cual puede hallarse una solución real para aquellos problemas en los la complejidad de sus ecuaciones, o bien la existencia de un gran conjunto de ellas, dificulte notablemente su resolución.

Las soluciones obtenidas son válidas únicamente para un número finito de valores de las variables de entrada y no para todo el espectro continuo. Así se consigue manejar un pequeño grupo de puntos de estudios lo que conlleva un ahorro computacional considerable.

Para aplicar el método a la generación termoeléctrica, basta con sustituir la ecuación general de transmisión de calor por una expresión en diferencias finitas, la cual debe ser válida en todos los puntos del sólido y únicamente en ciertos intervalos de tiempo.

Los puntos en los que la ecuación en diferencias finitas debe cumplirse son los nodos del sistema. Cada uno de ellos representa una parte del sólido al que se le aplique, que, en este caso, es el prototipo ensayado.

Como ejemplo, la división de un módulo termoeléctrico se realiza mediante doce nodos alineados como puede verse en la siguiente figura:



cc: Cerámico de la cara caliente del módulo

cf: Cerámico de la cara fría del módulo

p: Cada uno de los ocho nodos interiores que representan un décimo del material semiconductor

pc: Décima parte del material semiconductor más el contacto de cobre en la cara caliente

pf: Décima parte del material semiconductor más el contacto de cobre en la cara fría

**Figura 5.1-División de un módulo termoeléctrico en doce nodos**

Por tanto, el hecho de utilizar este método resolutivo permite resolver completamente el comportamiento del dispositivo termoeléctrico con un menor número de hipótesis simplificadas que los modelos analíticos.

El trabajo correspondiente a este apartado del proyecto consistió en la adaptación del modelo general de generación termoelectrica para poder simular aplicaciones de auto-refrigeración.

Para conseguir dicha adaptación se realizaron las siguientes actualizaciones:

- Nuevo esquema general de resistencias y capacidades:

El modelo general realiza una distribución de los nodos del sistema específica para generación por lo que es necesario aclarar y definir los nodos del elemento con auto-refrigeración, de forma que el sistema de ecuaciones sea lo más aproximado posible.

Para ello, se partió del prototipo construido y se establecieron nodos en las interfases entre sólidos, además de la división del módulo Peltier mostrada en la figura 5.2.

En la siguiente figura se representa la analogía eléctrica mediante resistencias y capacidades del circuito térmico del prototipo en la cual están indicados los nodos del sistema:

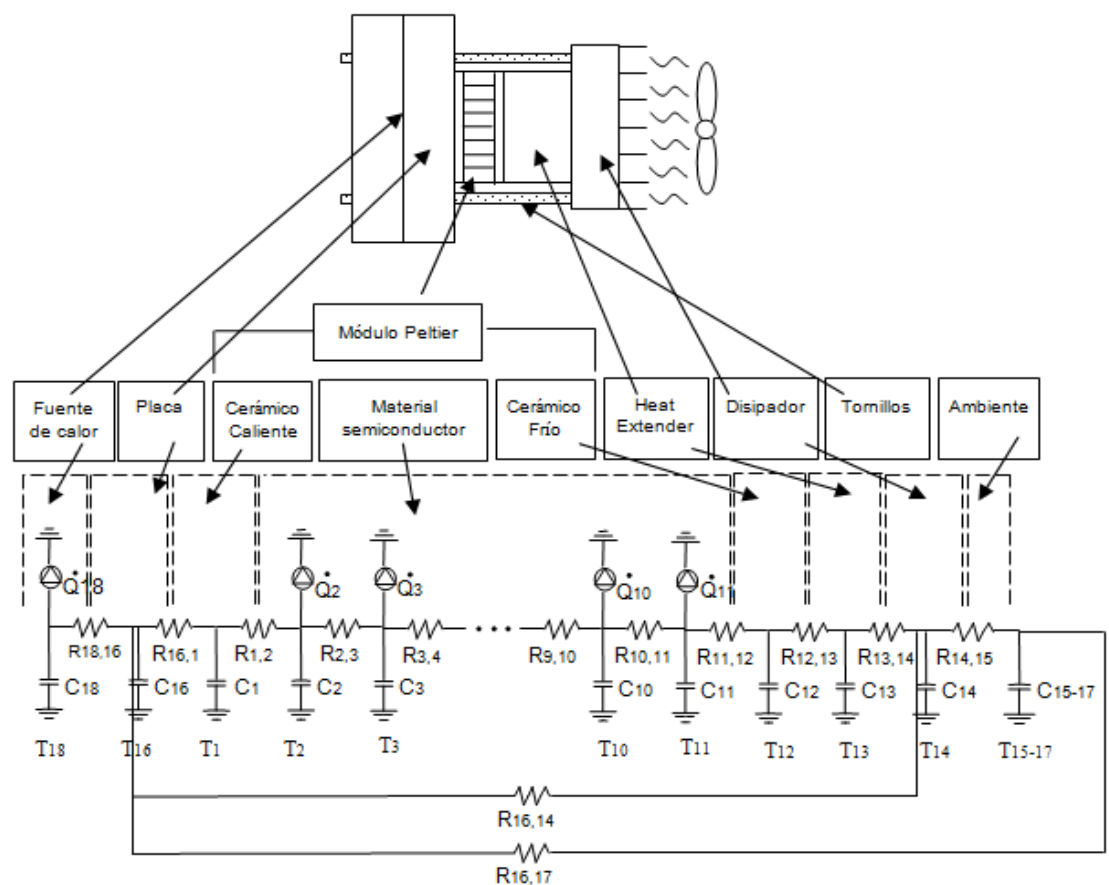


Figura 5.2-Analogía eléctrica del modelo

○Actualización de la resistencia de carga  $R_l$ :

El ventilador colocado en el prototipo representa la resistencia de carga conectada en los bornes de los módulos termoelectricos  $R_l$ , cuyo calor es variable con el funcionamiento. En el caso de que se encuentre parado su valor es de  $17\Omega$  y si está girando es de  $60\Omega$ .

En el modelo general, la resistencia de carga se consideraba constante, por lo que se introdujo un sencillo bucle en el cuál se imponía que la resistencia eléctrica del ventilador valiese  $60\Omega$  si la potencia generada por el módulo era superior a  $0,4\text{ W}$ , por lo que el modelo puede arrojar datos sobre el transitorio del sistema.

○Actualización de la resistencia térmica del disipador  $R_d$ :

La nomenclatura empleada para definir la resistencia térmica del disipador de aletas dentro del modelo computacional es  $R_d$ . El valor de dicha resistencia ha sido estimado mediante el software informático fluent introduciendo las características del disipador montado en el prototipo.

En el caso de que el ventilador esté en reposo la resistencia térmica es constante y de valor  $4,8\text{ k/W}$ . Sin embargo, cuando el ventilador está en funcionamiento, su valor es función del flujo másico de aire que lo atraviesa.

Este flujo másico no es constante durante el transitorio debido a que la velocidad de giro del ventilador tampoco lo es. Para ello es necesario dibujar la curva de funcionamiento del ventilador con la de pérdida de carga del disipador y poder extraer el dato del flujo másico.

Mediante la semejanza de máquinas hidráulicas y las curvas proporcionadas por el fabricante puede extraerse la curva del ventilador en cada momento ya que en función del salto térmico entre las caras del módulo Peltier la potencia generada es diferente, y por tanto la velocidad de giro del ventilador varía. Conforme más salto térmico existe, mayor velocidad de giro del ventilador, lo cual produce una mayor refrigeración lo que conlleva un aumento del salto térmico y así sucesivamente hasta que el sistema se estabiliza.

Al aproximar dichas curvas a funciones, puede implementarse consiguiendo que el programa calcule la resistencia térmica del disipador en cada momento y puedan extraerse datos más exactos del comportamiento del sistema.

Una vez implementadas estas actualizaciones, el modelo computacional es capaz de resolver la simulación de la auto-refrigeración. A pesar de que el programa es válido en este punto, se consideró realizar ciertas mejoras para aumentar su precisión, facilitar su uso y disminuir el coste computacional:

- Distinción P-N:

Los módulos Peltier están compuestos básicamente por pares de material semiconductor de tipo P y N conectados térmicamente en paralelo y eléctricamente en serie. Generalmente estos materiales están compuestos por el mismo material solo que únicamente cambia el dopado de los electrones por lo que sus resistividades eléctricas suelen ser de órdenes similares. Lo mismo ocurre cuando se habla de las conductividades térmicas de estos semiconductores P y N. Sin embargo, el coeficiente Seebeck, que es el parámetro que relaciona directamente el salto de temperatura con la diferencia de potencial generada, es opuesto en ambos tipos de semiconductores. Todas estas características simplificaban notoriamente el sistema de ecuaciones a resolver.

Por ello, en el modelo general, a la hora de introducir los datos referentes al tipo de módulos utilizados para la simulación se emplea un único valor del coeficiente Seebeck, de la conductividad térmica, de la resistividad eléctrica y del coeficiente Thomson.

Actualmente se está extendiendo el uso de distintos materiales para los dos tipos de elementos semiconductores que componen el módulo, por lo que cada vez es más usual encontrar módulos termoeléctricos compuestos por Bismuto-Teluro para el material tipo N, y Selenio-Teluro para el material tipo P. Esta nueva tendencia hace necesario analizarlos por separado para conseguir que el modelo simule con mayor exactitud estos nuevos tipos de pares termoeléctricos.

En el nuevo modelo se diferenció tanto para los elementos de material P como para los del tipo N cada una de sus propiedades, así como los coeficientes termoeléctricos.



Para ello se actualizaron las fichas de la base de datos a la que el programa recurre sobre módulos Peltier.

A pesar de que dicha mejora no implica un ahorro computacional debido a la introducción de más datos, sí que se consigue mayor precisión en los cálculos al definir concretamente los materiales semiconductores del módulo Peltier.

- Programación matricial:

La mayoría de los cálculos se realizaban mediante vectores de grandes dimensiones, lo cual provocaba un aumento del tiempo de cálculo del programa. Se introdujo una programación matricial ahorrando así una gran parte de memoria al operar.



## 6. ESTUDIO COMPUTACIONAL

El objetivo de este apartado es buscar un polinomio de respuesta que se ajuste a los datos obtenidos del modelo para una relación entre el flujo de calor de entrada y la temperatura del foco. Conociendo el grado de dicho polinomio, se establecerán el número mínimo de ensayos experimentales necesarios para poder realizar la validación del modelo [5].

### 6.1 Dimensionamiento del estudio

Se realizaron ciertos ensayos previos para determinar el límite superior de potencia calorífica con el que se podía trabajar, teniendo en cuenta la temperatura máxima de trabajo de las resistencias, así como el límite inferior para el cuál no se producía la auto-refrigeración.

Para determinar este límite superior se comenzó con un ensayo en el cuál las resistencias absorbían una potencia de 150W con lo que el foco de calor se mantenía una temperatura rondando los 80°C. Se procedió a incrementar la potencia en rangos de 15W hasta que, una vez estabilizado el sistema, la temperatura interior alcanzase los 120°C, límite de seguridad establecido para el buen funcionamiento de las resistencias. Se determinó que la potencia absorbida por las resistencias con la que el foco de calor tiene una temperatura de 120°C es de 230W. Sin embargo, para los ensayos posteriores se ha trabajado con un límite de potencia de 220W para evitar problemas de exceso de calentamiento de las resistencias.

Una vez conocido dicho límite superior, se decidió disminuir la potencia en intervalos de 10W hasta que el ventilador se detuviese, hecho que ocurrió para flujos entre 120W y 130W, por lo que se decidió dividir la zona de estudio en dos intervalos:

- ♦Zona 1: Ventilador sin funcionar. Como límite superior se fijaron los 120W ya explicados y se estableció el valor inferior en 60W.
- ♦Zona 2: Ventilador en funcionamiento. Comprende desde los 130W hasta los 220W, límite obtenido por las condiciones de máxima temperatura de trabajo.

La potencia eléctrica que los módulos generan es variable en función del flujo de calor que los atraviese y de la resistencia de carga que tienen conectada, de tal modo que para un flujo de calor fijo, la potencia máxima se produce cuando la resistencia de carga conectada es igual a la propia resistencia interna de los módulos, y se hace cero para estados de cortocircuito y circuito abierto.

En el caso que se plantea en este estudio, al colocar cuatro módulos en serie con una resistencia interna de alrededor de  $10\Omega$  cada uno, el máximo de potencia se generará al conectar una carga de  $40\Omega$ . Si no se dispone de un ventilador con esta resistencia eléctrica, conviene emplear uno de valores algo superiores, ya que así la curva de potencia generada cae rápidamente para valores inferiores a ese máximo, mientras que prácticamente se mantiene para valores mayores. Esta es la justificación de haber instalado un ventilador de  $60\Omega$ .

Un hecho comprobado en los experimentos previos, es que en la Zona 1, el máximo de potencia generada no llega al mínimo necesario para mover el ventilador, por lo que este permanecía quieto. Sin embargo, dentro de la Zona 2, sí que se generaba potencia suficiente para mantener en funcionamiento el ventilador, el único problema que creaba para los flujos menores de esta zona era el superar el par de arranque del ventilador. Al estar parado, éste ofrecía una resistencia de carga de  $17\Omega$  y al funcionar otra de  $60\Omega$ , por lo que en ciertos puntos era necesario un aporte extra de energía para que arrancase.

La metodología para cada ensayo es muy concreta, se comienza con la temperatura de la cámara frigorífica constante de  $0^{\circ}\text{C}$ . A continuación se enciende la fuente de potencia y se establecen la intensidad y el voltaje adecuados para obtener la potencia deseada, dejando que el sistema se estabilice a lo largo del tiempo y alcanzando la temperatura que posteriormente se anotará.

## 6.2 Resultados computacionales

A continuación, se exponen los resultados obtenidos mediante la simulación computacional para las diferentes zonas de estudio.

### 6.2.1 Zona 1

En el estudio de la zona 1, se introdujo en el modelo un rango de potencias que abarcaba desde los 60W hasta los 120W con incrementos de 1W, el cual devolvía la temperatura del foco de calor correspondiente a cada potencia. Una vez clasificados estos datos, se realizó un estudio de regresión polinomial mediante el software estadístico *STATGRAPHICS* para determinar a qué tipo de curva se ajusta el modelo.

Los datos obtenidos para esta zona se recogen en la tabla 6.1:

| $Q_{input}$ [W] | Temperatura foco de calor [°C] | $Q_{input}$ [W] | Temperatura foco de calor [°C] | $Q_{input}$ [W] | Temperatura foco de calor [°C] |
|-----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 60              | 48,94                          | 80              | 63,66                          | 100             | 77,81                          |
| 61              | 49,69                          | 81              | 64,38                          | 101             | 78,50                          |
| 62              | 50,44                          | 82              | 65,10                          | 102             | 79,20                          |
| 63              | 51,19                          | 83              | 65,82                          | 103             | 79,89                          |
| 64              | 51,94                          | 84              | 66,54                          | 104             | 80,58                          |
| 65              | 52,68                          | 85              | 67,25                          | 105             | 81,27                          |
| 66              | 53,42                          | 86              | 67,96                          | 106             | 81,95                          |
| 67              | 54,17                          | 87              | 68,68                          | 107             | 82,64                          |
| 68              | 54,91                          | 88              | 69,39                          | 108             | 83,33                          |
| 69              | 55,64                          | 89              | 70,09                          | 109             | 84,01                          |
| 70              | 56,38                          | 90              | 70,80                          | 110             | 84,69                          |
| 71              | 57,12                          | 91              | 71,51                          | 111             | 85,38                          |
| 72              | 57,85                          | 92              | 72,21                          | 112             | 86,06                          |
| 73              | 58,58                          | 93              | 72,92                          | 113             | 86,74                          |
| 74              | 59,31                          | 94              | 73,62                          | 114             | 87,41                          |
| 75              | 60,04                          | 95              | 74,32                          | 115             | 88,09                          |
| 76              | 60,77                          | 96              | 75,02                          | 116             | 88,77                          |
| 77              | 61,49                          | 97              | 75,72                          | 117             | 89,44                          |
| 78              | 62,22                          | 98              | 76,42                          | 118             | 90,12                          |
| 79              | 62,94                          | 99              | 77,11                          | 119             | 90,79                          |
|                 |                                |                 |                                | 120             | 91,46                          |

Tabla 6.1-Datos computacionales Zona 1

La primera opción barajada fue la de ajustar a polinomios de grado 1 y 2, pero la aproximación era bastante mala debido a que los residuos no seguían una distribución normal de media cero y varianza constante.

Si se realiza el ajuste a un polinomio de grado tres, se obtiene un  $R^2$  del 100% por lo se deduce que es una buena aproximación. Por tanto, para poder definir el sistema, son necesarios cuatro puntos dentro del rango de potencias que abarca la zona 1.

El polinomio respuesta obtenido es el mostrado en la ecuación 6.1.

$$T_{\text{foco calor}} = 0,528476 + 0,868133 \cdot Q_{\text{input}} - 0,0011217 \cdot Q_{\text{input}}^2 + 0,00000168485 \cdot Q_{\text{input}}^3 \quad (6.1)$$

En la siguiente tabla se recogen parte de los datos del informe que el programa estadístico ofrece tras el análisis. Se aprecia que el p-valor es cero para todos los parámetros del polinomio respuesta por lo que son estadísticamente significativos.

|              |               | Error        | Estadístico |         |
|--------------|---------------|--------------|-------------|---------|
| Parámetro    | Estimado      | Estándar     | T           | Valor-P |
| CONSTANTE    | 0,528476      | 0,0656606    | 8,04859     | 0,0000  |
| Qinput [W]   | 0,868133      | 0,00227572   | 381,476     | 0,0000  |
| Qinput [W]^2 | -0,0011217    | 0,0000257449 | -43,5699    | 0,0000  |
| Qinput [W]^3 | 0,00000168485 | 9,51958E-8   | 17,6987     | 0,0000  |

Tabla 6.2- ANOVA para las variables según orden de ajuste

Gráfico de Residuos

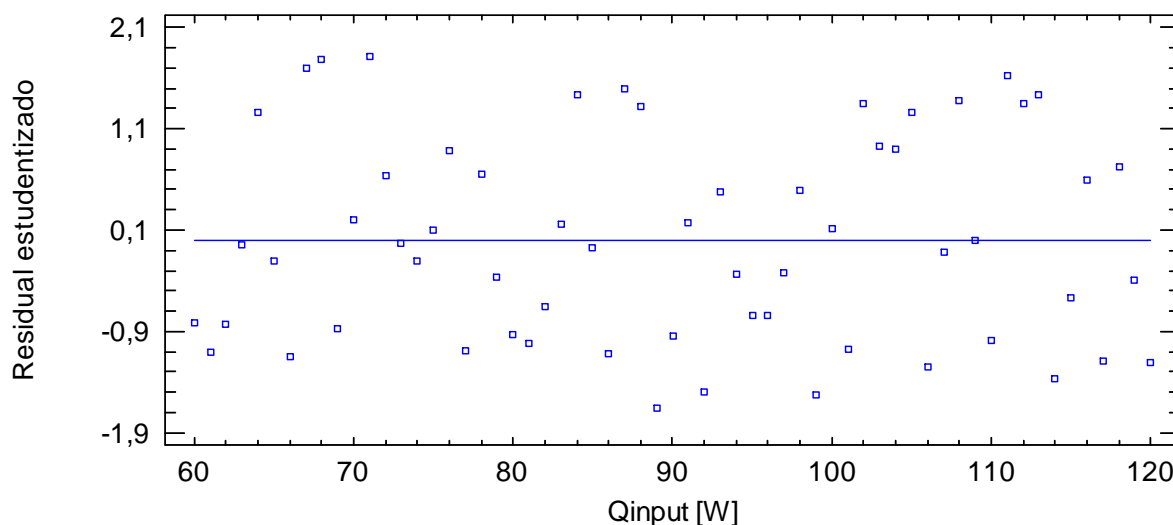


Figura 6.1-Gráfico de dispersión de residuos

Así mismo, otro dato importante devuelto por el programa es la inexistencia de residuos atípicos.

El resto del informe obtenido sobre este ajuste se encuentra en el Anexo I.

**Nota:** haber escogido intervalos de 1W en esta zona y de 2W en la Zona 2 se justifica con el hecho de que la primera de éstas es más pequeña y se decidió tomar más puntos.

## 6.2.3 Zona 2

El procedimiento seguido para el estudio de esta zona, comprendida entre 130W y 220W, es idéntico al realizado para la Zona 1.

En la siguiente tabla 6.3 exponen los resultados obtenidos para esta zona:

| $Q_{input}$ [W] | Temperatura foco de calor [°C] | $Q_{input}$ [W] | Temperatura foco de calor [°C] |
|-----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| 130             | 78,15                          | 176             | 102,05                         |
| 132             | 79,22                          | 178             | 103,06                         |
| 134             | 80,29                          | 180             | 104,06                         |
| 136             | 81,35                          | 182             | 105,07                         |
| 138             | 82,41                          | 184             | 106,07                         |
| 140             | 83,47                          | 186             | 107,08                         |
| 142             | 84,53                          | 188             | 108,08                         |
| 144             | 85,58                          | 190             | 109,07                         |
| 146             | 86,63                          | 192             | 110,07                         |
| 148             | 87,67                          | 194             | 111,07                         |
| 150             | 88,71                          | 196             | 112,06                         |
| 152             | 89,75                          | 198             | 113,05                         |
| 154             | 90,79                          | 200             | 114,05                         |
| 156             | 91,83                          | 202             | 115,04                         |
| 158             | 92,86                          | 204             | 116,02                         |
| 160             | 93,89                          | 206             | 117,01                         |
| 162             | 94,92                          | 208             | 118,00                         |
| 164             | 95,94                          | 210             | 118,98                         |
| 166             | 96,96                          | 212             | 119,96                         |
| 168             | 97,99                          | 214             | 120,95                         |
| 170             | 99,00                          | 216             | 121,93                         |
| 172             | 100,02                         | 218             | 122,91                         |
| 174             | 101,00                         | 220             | 123,90                         |

Tabla 6.3-Datos computacionales Zona 2

Tras realizar un estudio estadístico como el empleado en la Zona 1, se observa que el modelo también ajusta correctamente a un polinomio de grado tres (6.2) con un  $R^2$  del 100%.

$$T_{\text{foco calor}} = -0,916962 + 0,699679 \cdot Q_{\text{input}} - 0,000850688 \cdot Q_{\text{input}}^2 + 0,00000113175 \cdot Q_{\text{input}}^3 \quad (6.2)$$

|              |               | Error        | Estadístico |         |
|--------------|---------------|--------------|-------------|---------|
| Parámetro    | Estimado      | Estándar     | T           | Valor-P |
| CONSTANTE    | -0,916962     | 0,188565     | -4,86285    | 0,0000  |
| Qinput [W]   | 0,699679      | 0,00332476   | 210,445     | 0,0000  |
| Qinput [W]^2 | -0,000850688  | 0,0000193093 | -44,0558    | 0,0000  |
| Qinput [W]^3 | 0,00000113175 | 3,69559E-8   | 30,6244     | 0,0000  |

Tabla 6.4- ANOVA para las variables según orden de ajuste

Cabe destacar la inexistencia de residuos atípicos en el ajuste.

Gráfico de Residuos

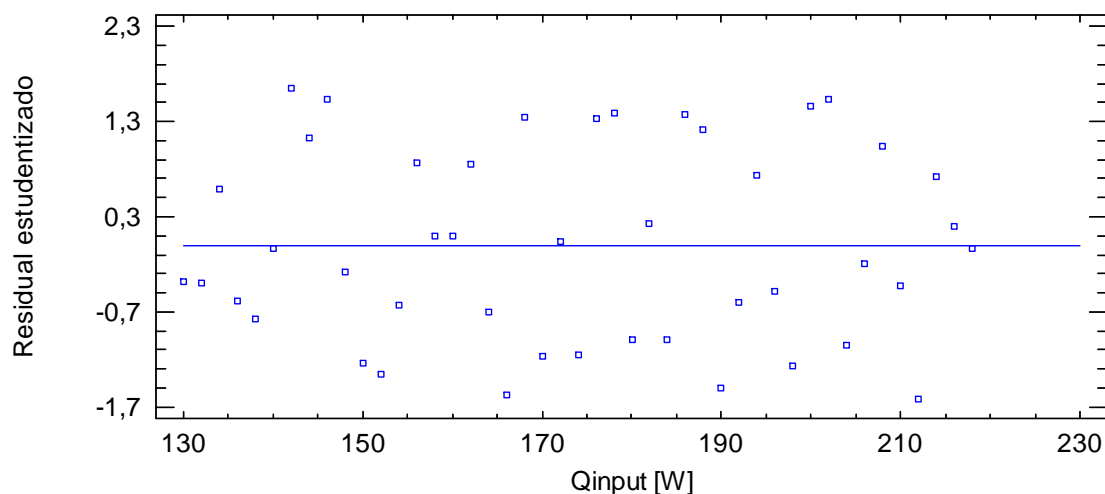


Figura 6.2-Gráfico de dispersión de residuos

El resto del informe obtenido sobre este ajuste se encuentra en el Anexo I.

### 6.3 Conclusiones

Ambas zonas se ajustan computacionalmente a un polinomio de grado tres. El número mínimo de puntos necesarios para obtener una curva de dicho grado es cuatro. Por tanto, para realizar la validación de cada una de las dos zonas, se deberán tomar cuatro puntos distintos, e igualmente espaciados, como mínimo.

## 7. ESTUDIO EXPERIMENTAL

### 7.1 Preparación del ensayo: Equipos empleados

Los ensayos experimentales han sido realizados en el laboratorio de termotecnia emplazado en los talleres de la Universidad Pública de Navarra.

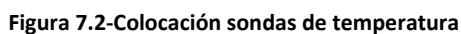
Los equipos de los que se dispone y han sido empleados en la ejecución de este proyecto fin de carrera son:

- Cámara climática: Marca Dycometal. En ella se colocó una mesa y sobre ella el prototipo. La temperatura de consigna establecida para todos los ensayos fue de 0°C. Dispone de acceso exterior para introducir las sondas de temperatura y poder realizar todas las mediciones desde el exterior sin necesidad de alterar el estado interior.



Figura 7.1-Cámara climática

- Sondas de temperatura: Se colocaron seis sondas en diferentes puntos del prototipo para obtener los datos y poder controlar en cada instante las temperaturas. En la figura 7.1, se muestra esquemáticamente dónde se colocaron:



**Figura 7.3-Adquisidor de datos**



- Fuente de potencia: Conectada a las resistencias eléctricas. Se establecen la intensidad y el voltaje para obtener la potencia deseada. Para los cálculos, se han tenido en cuenta las pérdidas eléctricas debidas a la resistencia de los cables que realizan la conexión, que asciende a  $0.09\ \Omega$ . El modelo es Grelco GVD3020 (0-30Vcc, 0-20a).



Figura 7.4- Fuente de potencia

- Polímetro: Instrumento mediante el cual se miden la intensidad y el voltaje generado por todos los módulos Peltier mediante dos cables conectados a ellos, y así poder determinar la potencia eléctrica generada y que alimenta el ventilador.

## 7.2 Elección de los puntos de ensayo

Como ya se ha comentado en el Capítulo 5, se establecieron dos zonas de estudio diferenciadas: Zona 1 y Zona 2, las cuales corresponden a los intervalos de 60W a 120W y de 130W a 220W respectivamente.

El haber aproximado el modelo computacional a polinomios de grado 3 determina el número de ensayos a realizar en cada zona. Con la elección de cuatro puntos para cada una de ellas, puede definirse correctamente el comportamiento del prototipo.

Con el fin de generar datos experimentales suficientes, se decidió estudiar tres réplicas en cada uno de los puntos.

Por tanto, la elección de los puntos de ensayo quedó de la siguiente manera:

♦Zona 1: Tomando intervalos de 20 W se obtienen cuatro puntos de ensayo: 60W, 80W, 100W y 120W.

♦Zona 2: Seleccionando intervalos de 30W se originan otros cuatro puntos de ensayo: 130W, 160W, 190W y 220W.

### 7.3 Resultados experimentales

En el siguiente apartado se exponen los resultados experimentales de los diferentes ensayos realizados en base en lo expuesto en los apartados anteriores.

#### 7.3.1 Zona 1

| $Q_{\text{resistencias}}$<br>[W] | Módulos Termoelectrónicos   |                             |                          |                             | Temperatura<br>foco calor [°C] |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|                                  | $V_{\text{multímetro}}$ [V] | $I_{\text{multímetro}}$ [A] | Potencia<br>generada [W] | Salto térmico<br>caras [°C] |                                |
| 60                               | 1,440                       | 0,085                       | 0,122                    | 7,5                         | 50,7                           |
| 60                               | 1,440                       | 0,085                       | 0,122                    | 7,4                         | 49,6                           |
| 60                               | 1,440                       | 0,085                       | 0,122                    | 7,6                         | 50,7                           |
| 80                               | 1,800                       | 0,106                       | 0,191                    | 9,1                         | 65,1                           |
| 80                               | 1,780                       | 0,105                       | 0,187                    | 9,7                         | 63,5                           |
| 80                               | 1,780                       | 0,105                       | 0,187                    | 9,6                         | 63,6                           |
| 100                              | 2,150                       | 0,126                       | 0,271                    | 11,9                        | 78,7                           |
| 100                              | 2,140                       | 0,126                       | 0,270                    | 12,0                        | 77,5                           |
| 100                              | 2,170                       | 0,128                       | 0,278                    | 12,0                        | 77,4                           |
| 120                              | 2,570                       | 0,151                       | 0,388                    | 14,1                        | 91,4                           |
| 120                              | 2,580                       | 0,152                       | 0,392                    | 14,3                        | 92,3                           |
| 120                              | 2,590                       | 0,152                       | 0,394                    | 14,2                        | 92,0                           |

Tabla 7.1-Resultados experimentales Zona 1

Estos datos se ajustan a un modelo polinomial de primer orden (6.1) con una  $R^2$  de 99,84% y sin la aparición de residuos atípicos. Este resultado se corresponde con lo esperado ya que si el modelo computacional ajusta a un polinomio de tercer grado, los resultados deben ajustar a otro polinomio de tercer grado o menos.

$$\text{Temperatura foco de calor} = 8,484 + 0,69615 \cdot Q_{\text{input}} \quad (6.1)$$

## 7.3.2 Zona 2

| $Q_{\text{resistencias}}$<br>[W] | Módulos Termoelectricos     |                             |                          |                             | Temperatura<br>foco calor [°C] |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|                                  | $V_{\text{multímetro}}$ [V] | $I_{\text{multímetro}}$ [A] | Potencia<br>generada [W] | Salto térmico<br>caras [°C] |                                |
| 130                              | 6,400                       | 0,107                       | 0,685                    | 24,13                       | 78,7                           |
| 130                              | 6,490                       | 0,108                       | 0,701                    | 24,99                       | 77,4                           |
| 130                              | 6,560                       | 0,109                       | 0,715                    | 24,44                       | 77,3                           |
| 160                              | 8,240                       | 0,137                       | 1,129                    | 30,85                       | 93,3                           |
| 160                              | 8,250                       | 0,138                       | 1,139                    | 30,99                       | 91,7                           |
| 160                              | 8,250                       | 0,138                       | 1,139                    | 31,48                       | 91,9                           |
| 190                              | 9,940                       | 0,166                       | 1,650                    | 36,82                       | 107,9                          |
| 190                              | 9,930                       | 0,166                       | 1,648                    | 36,47                       | 107,0                          |
| 190                              | 10,010                      | 0,167                       | 1,672                    | 37,41                       | 106,3                          |
| 220                              | 11,590                      | 0,193                       | 2,237                    | 42,72                       | 123,0                          |
| 220                              | 11,580                      | 0,193                       | 2,235                    | 42,44                       | 121,5                          |
| 220                              | 11,640                      | 0,194                       | 2,258                    | 41,97                       | 121,9                          |

Tabla 7.2-Resultados experimentales Zona 2

Realizando el mismo estudio que el de la Zona 1, se obtiene que estos datos experimentales ajustan a una curva de grado uno (6.2), con una  $R^2$  de 99,83%, dato que concuerda con lo esperado al realizar el estudio del modelo computacional.

$$\text{Temperatura foco de calor} = 13,6278 + 0,492556 \cdot Q_{\text{input}} \quad (6.2)$$

Los estudios de regresión polinomial de ambas zonas se encuentran en el Anexo II del proyecto.

## 8-ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALIDACIÓN

Para realizar la validación del sistema, solamente se tuvo en cuenta la temperatura del foco de calor que se alcanzaba para cada uno de los ocho flujos de calor de entrada considerados. Este parámetro es el más importante porque el proyecto se centra en intentar disminuir su valor mediante tecnología termoelectrica sin consumo de energía externa. Así, para cada punto de validación, se tienen tres valores experimentales de la temperatura del foco y un valor dado por el modelo matemático. Cabe recordar que el modelo es determinístico, es decir, no tiene variabilidad en sus resultados, por lo que siempre se obtiene el mismo resultado para las mismas variables de entrada.

Una vez obtenidos los datos computacionales y los datos experimentales en capítulos anteriores, se procedió a realizar una comparación entre ellos mediante un análisis estadístico de contraste de hipótesis. Se toma el contraste de hipótesis  $t$ , que indica si el dato computacional extraído se aproxima a la media experimental en cada uno de esos puntos. Este contraste de hipótesis construye el intervalo de confianza para la media con un nivel de confianza  $(1-\alpha)$ , y analiza si el valor experimental entra dentro de este intervalo o no.

La hipótesis nula  $H_0$  escogida es que el valor del punto computacional sí es igual a la media de los resultados experimentales para dicho punto, mientras que la hipótesis alternativa  $H_1$  es que no son iguales. Por tanto, si el P-Valor obtenido es mayor que  $\alpha$  (concretamente ha tomado  $\alpha=0,05$  para todos los contrastes), se aceptará la hipótesis nula de que las medias son iguales, y, en caso contrario, se rechazará.

### 8.1 Validación Zona 1

A continuación se exponen los resultados del contraste de hipótesis para cada punto de estudio dentro de la Zona 1:

| 60 W   |                               |
|--|-------------------------------|
| Valor Experimental Temperatura Foco de Calor:  | $50,3 \pm 1,6^\circ\text{C}$  |
| Valor Computacional Temperatura Foco de Calor: | $48,94^\circ\text{C}$         |
| $H_0$ : Media= 48,9                            |                               |
| P-Valor= 0,0628 > 0,05                         | → Se acepta la hipótesis nula |

Tabla 8.1-Validación para 60W

| 80 W   |                                |
|--|--------------------------------|
| Valor Experimental Temperatura Foco de Calor:  | $64,1 \pm 2,3^{\circ}\text{C}$ |
| Valor Computacional Temperatura Foco de Calor: | $63,66^{\circ}\text{C}$        |
| $H_0$ : Media= 63,7                            |                                |
| P-Valor= 0,5143 > 0,05                         | → Se acepta la hipótesis nula  |

Tabla 8.2- Validación para 60W

| 100 W  |                                |
|--|--------------------------------|
| Valor Experimental Temperatura Foco de Calor:  | $77,9 \pm 1,8^{\circ}\text{C}$ |
| Valor Computacional Temperatura Foco de Calor: | $77,81^{\circ}\text{C}$        |
| $H_0$ : Media= 77,8                            |                                |
| P-Valor= 0,5143 > 0,05                         | → Se acepta la hipótesis nula  |

Tabla 8.3-Validación para 60W

| 120 W  |                                |
|--|--------------------------------|
| Valor Experimental Temperatura Foco de Calor:  | $91,9 \pm 1,1^{\circ}\text{C}$ |
| Valor Computacional Temperatura Foco de Calor: | $91,46^{\circ}\text{C}$        |
| $H_0$ : Media= 91,5                            |                                |
| P-Valor= 0,2382 > 0,05                         | → Se acepta la hipótesis nula  |

Tabla 8.4-Validación para 60W

## 8.2 Validación Zona 2

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos tras el análisis estadístico realizado a los puntos de estudio pertenecientes a la Zona 2:

| 130 W  |                                 |
|--|---------------------------------|
| Valor Experimental Temperatura Foco de Calor:  | $77,80 \pm 1,9^{\circ}\text{C}$ |
| Valor Computacional Temperatura Foco de Calor: | $78,15^{\circ}\text{C}$         |
| $H_0$ : Media= 78,2                            |                                 |
| P-Valor= 0,5188 > 0,05                         | → Se acepta la hipótesis nula   |

Tabla 8.5-Validación para 130W

| 160 W  |                                |
|--|--------------------------------|
| Valor Experimental Temperatura Foco de Calor:  | $92,3 \pm 2,2^{\circ}\text{C}$ |
| Valor Computacional Temperatura Foco de Calor: | $93,89^{\circ}\text{C}$        |
| $H_0$ : Media= 93,9                            |                                |
| P-Valor= $0,0872 > 0,05$                       | → Se acepta la hipótesis nula  |

Tabla 8.6-Validación para 160W

| 190 W  |                                 |
|--|---------------------------------|
| Valor Experimental Temperatura Foco de Calor:  | $107,1 \pm 1,9^{\circ}\text{C}$ |
| Valor Computacional Temperatura Foco de Calor: | $109,07^{\circ}\text{C}$        |
| $H_0$ : Media= 109,1                           |                                 |
| P-Valor= $0,00543 > 0,05$                      | → Se acepta la hipótesis nula   |

Tabla 8.7-Validación para 190W

| 220 W  |                                 |
|--|---------------------------------|
| Valor Experimental Temperatura Foco de Calor:  | $122,1 \pm 1,9^{\circ}\text{C}$ |
| Valor Computacional Temperatura Foco de Calor: | $123,90^{\circ}\text{C}$        |
| $H_0$ : Media= 123,90                          |                                 |
| P-Valor= $0,0588 > 0,05$                       | → Se acepta la hipótesis nula   |

Tabla 8.8-Validación para 220W

### 8.3 Análisis de los resultados

Los resultados de la temperatura del foco de calor para diferentes flujos de potencia obtenidos tanto experimental como computacionalmente, se resumen en la Tabla 8.9. Para confirmar cómo de precisa es la aproximación que el modelo realiza al sistema real, se estudiaron los errores relativos entre los resultados obtenidos según la ecuación 8.1 siguiente:

$$\text{Error relativo } \% = \frac{\text{Valor computacional} - \text{Valor medio experimental}}{\text{Valor medio experimental}} \times 100 \quad (8.1)$$

| Flujo de Calor | Media Experimental | Valor Simulación | Error relativo |
|----------------|--------------------|------------------|----------------|
| 60 W           | 50,3 °C            | 48,9 °C          | 2,8%           |
| 80 W           | 64,1 °C            | 63,7 °C          | 0,6%           |
| 100 W          | 77,9 °C            | 77,8 °C          | 0,1%           |
| 120 W          | 91,9 °C            | 91,5 °C          | 0,5%           |
| 130 W          | 77,8 °C            | 78,2 °C          | 0,4%           |
| 160 W          | 92,3 °C            | 93,9 °C          | 1,7%           |
| 190 W          | 107,1 °C           | 109,1 °C         | 1,8%           |
| 220 W          | 122,1 °C           | 123,9 °C         | 1,5%           |

Tabla 8.9-Errores relativos entre resultados experimentales y computacionales

El error es independiente a las unidades empleadas en la medición de las temperaturas (°C o K) ya que en los ensayos experimentales, al ser la temperatura ambiente igual a cero grados centígrados, se mide realmente el salto entre el foco de calor y el ambiente.

Como se puede observar, los errores relativos son bastante pequeños tanto para la Zona 1, como para la Zona.

En las Gráficas 8.1 y 8.2 están representados los datos mencionados:

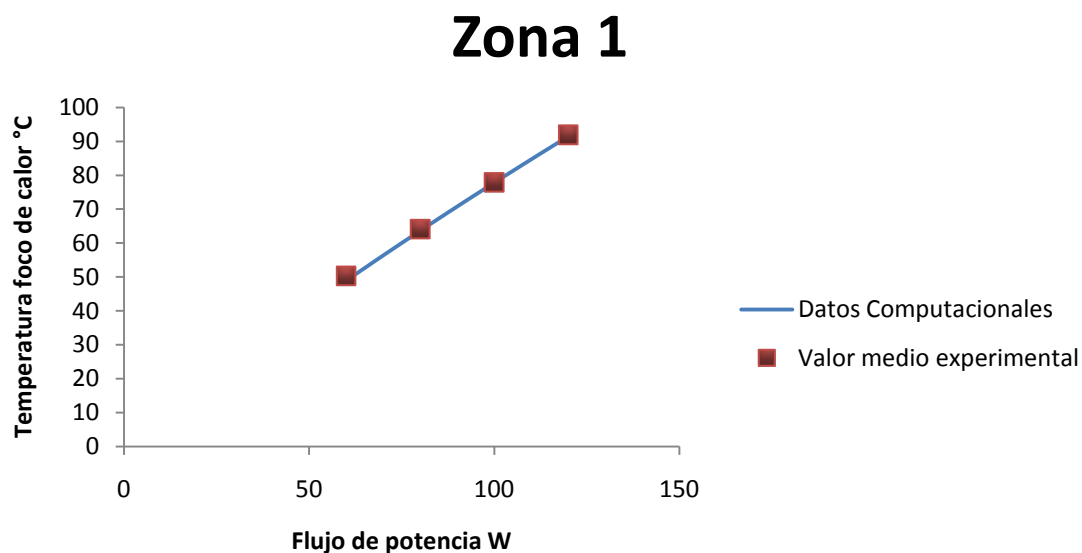


Gráfico 8.1-Representación resultados Zona 1

## Zona 2

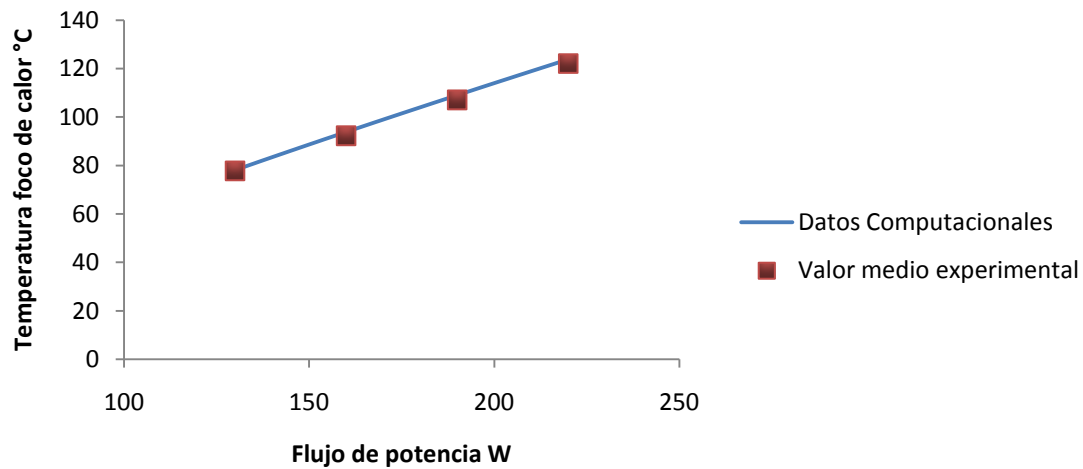


Gráfico 8.2- Representación resultados Zona 2

Como se observa, los puntos experimentales prácticamente coinciden con las curvas de datos que el modelo computacional devuelve, por tanto, puede afirmarse que todos los puntos se ajustan satisfactoriamente. Además, los errores relativos indican que el error máximo cometido se produce para 190 W, el mayor flujo de potencia, y es de 1,8%, por lo que se deberá tener en cuenta en los futuros usos de este modelo computacional.

Con todo esto, puede afirmarse que el modelo computacional para estudio de la auto-refrigeración termoeléctrica es válido, con lo que se procederá a estudiar en el siguiente capítulo, una posible aplicación.



## 9. APLICACIÓN

Para concluir con el proyecto, se buscó una aplicación para la cuál pueda ser posible instalar un sistema de auto-refrigeración termoeléctrica similar al estudiado. No es objeto de este Proyecto Fin de Carrera el diseñar dicho sistema, sino realizar un estudio previo sobre la viabilidad de la auto-refrigeración termoeléctrica.

La búsqueda de la aplicación se centró en la industria eléctrica-electrónica de potencia por diferentes motivos:

- La temperatura máxima de trabajo de los componentes limita considerablemente sus potencias de trabajo, por lo que necesitan una buena refrigeración.
- Emiten una gran cantidad de calor por  $m^2$  debido a que, generalmente, sus tamaños son relativamente pequeños.
- Suelen alojarse en compartimentos de paredes planas sobre las cuales pueden instalarse fácilmente módulos termoeléctricos.
- Es un sector muy amplio en la industria.

Se contactó con Acciona Energía para acudir a la Central Hidroeléctrica Irati, situada en el pueblo Oroz-Betelu. Dispone de tres grupos alternos con turbina Francis y puede generar una potencia de hasta 3000kW.

**Figura 9.1-Vista de la central**

Cada grupo turbina-alternador, está conectado a un armario eléctrico donde se encuentra un convertidor estático compacto de potencia con el que se transforma la energía eléctrica continua proveniente del grupo alterno en corriente alterna. Además, dentro del mismo armario, se encuentra un pequeño transformador de excitación de 19kVA que eleva la tensión hasta 220V.

**Figura 9.2-Armario de potencia del Grupo 2**

Dentro de la central tienen el problema de que este armario se calienta en exceso, y a pesar de que en la parte superior existe un pequeño ventilador y una rejilla en la inferior, no es suficiente para refrigerarlo. En los últimos cinco años, el transformador ha sido sustituido dos veces porque se sobrecalentó y ardió. Tanto es este sobrecalentamiento, que en épocas en las que se genera abundante electricidad necesitan abrir el armario y el ventanal situado detrás de él para que la alarma de temperatura no salte y corte la conexión.

Mediante un termómetro digital infrarrojo para poder medir a distancia, se tomaron datos de las temperaturas de los focos de calor dentro del armario, dando como resultado que los convertidores de potencia se encontraban cerca de los 50°C y el transformador rondaba los 98°C.

Se decidió aplicar la auto-refrigeración únicamente al transformador ya que, al encontrarse a una temperatura más alta, ofrece más posibilidades.

Para conocer la potencia que disipaba el transformador en forma de calor se consultaron los datos digitalizados por el sistema informático de control, con lo que se estima que pierde, aproximadamente, unos 650W.

**Figura 9.3- Termómetro láser****Figura 9.4-Lectura de temperatura en el transformador**

### 9.1 Estudio de la viabilidad de la auto-refrigeración

El transformador tiene unas medidas de 60cm x 30cm x 15 cm. Para poder aproximar la aplicación al modelo computacional, se propone cubrir los laterales 1 y 2 con una chapa de aluminio de 3mm de grosor, lugar donde se colocarán los módulos posteriormente. La elección de estas superficies se debe a que la pérdida de calor se produce mayoritariamente tanto a través de ellas como por sus opuestas en la parte trasera del transformador.

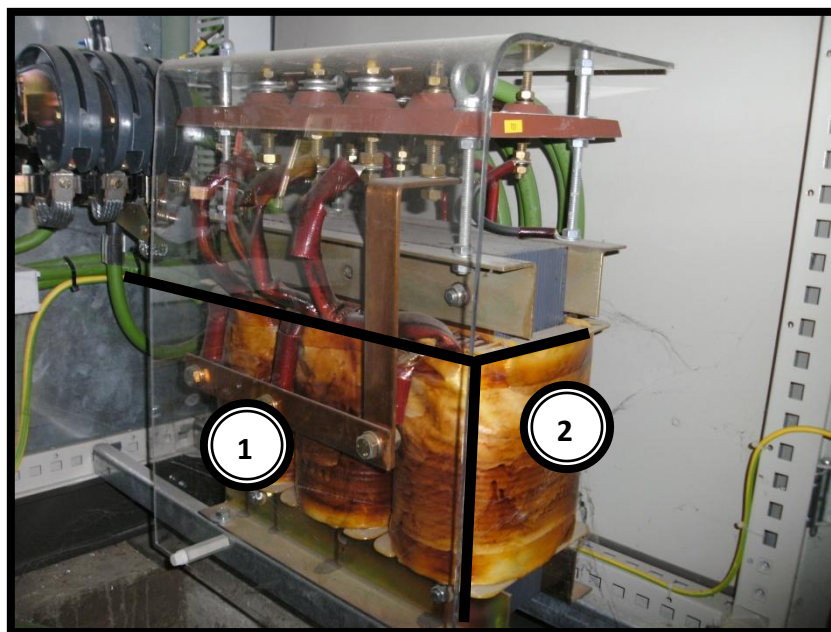


Figura 9.5-Transformador de excitación

Para poder realizar el estudio de la viabilidad de la auto-refrigeración termoeléctrica en el transformador, es necesario determinar cuatro parámetros que se introducirán en el modelo:

- ❖ *Flujo de calor  $Q$  [W]*: Determinante para calcular la potencia eléctrica generada por los módulos, su valor es un dato proporcionado por Acciona Energía y es de 650W.
- ❖ *Coefficiente de convección  $h$  [W/m<sup>2</sup>°C]*: Valor dentro del armario cuyo cálculo se detalla en los apartados 9.1.1 y 9.1.2.

- ❖ *Resistencia de la placa  $R_{pla}$  [ $m^2C / W$ ]:* Resistencia térmica de la placa que se colocará en contacto con el transformador y servirá de base para los módulos termoeléctricos, detallado en el apartado 9.1.2.
- ❖ *Resistencia de pérdidas  $R_{perd}$  [ $m^2C / W$ ]:* Resistencia térmica entre placa y el aire, por donde circula el flujo de calor que no atraviesa los módulos, desarrollada en el apartado 9.1.2.

#### 9.1.1 – Estado actual

Como se ha explicado antes, el armario tiene un ventilador extractor de aire situado en la parte superior del armario que no se detiene a no ser que el convertidor esté en situación de parada y refrigerado. Además, en la parte inferior, existe una rejilla por la que se toma aire y su embocadura está delante del transformador.

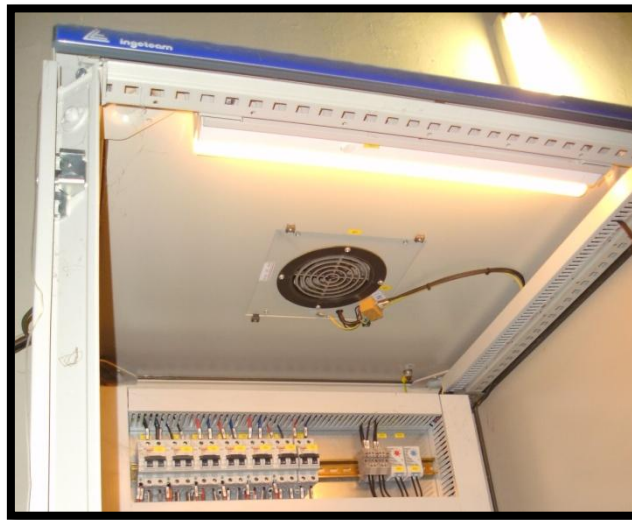


Figura 9.6-Detalle del ventilador extractor

Además, en aquellos momentos en los que este ventilador no consigue evacuar todo el calor, es necesario abrir la puerta del armario e incluso el ventanal situado detrás. Como generalmente la central hidroeléctrica comienza a funcionar a finales de Octubre y termina

alrededor del mes de Junio, puede considerarse que las temperaturas ambiente oscilan entre los 10°C y los 30°C. Por tanto, para estudiar el caso más desfavorable, se va a considerar un salto térmico  $\Delta T = 100^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C} = 70^{\circ}\text{C}$ . (9.1)

Como el ventilador siempre está en funcionamiento, y además suelen abrirse la puerta y las ventanas originándose corrientes de aire, se ha tomado un coeficiente de convección  $h=20 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

### 9.1.2 – Solución propuesta

Con la colocación de dos planchas de aluminio, una de 30cm x 60cm (Lateral 1) y otra de 30cm x 15 cm (Lateral 2), se propone instalar 5 conjuntos idénticos al prototipo experimentado, es decir, cada conjunto de cuatro módulos termoeléctricos, seguidos de un taco de aluminio y un dissipador de aletas, sobre el que se coloca el ventilador. Además, se propone sustituir el ventilador colocado en la parte superior por una rejilla, por lo que dentro del armario únicamente existirá convección natural, asignándole un valor estimativo al coeficiente de convección de  $5 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

Los otros datos necesarios para realizar el estudio son:

$$R_{\text{placa}} = \frac{\text{espesor placa}}{\text{área placa} \times \text{conductividad aluminio}} = \frac{0,003}{0,45 \times 202,4} = 0,000032 \text{ m}^2\text{C} / \text{W} \quad (9.2)$$

$$R_{\text{perd}} = \frac{1}{h \times (\text{área placas} - \text{área dissipadores})} = \frac{1}{5 \times (0,45 - 0,018)} = 0,4695 \text{ m}^2\text{C} / \text{W} \quad (9.3)$$

Una vez obtenidos los cuatro parámetros, se introdujeron en el modelo para estudiar si era posible la auto-refrigeración. Los resultados aportados fueron:

- Temperatura del foco de calor: 90,1°C, por lo que se ha conseguido reducir este valor en 10°C.
- Salto de temperatura entre las caras de los módulos: 26,8°C.
- Potencia generada por cada grupo de cuatro módulos: 0,84 W.

## 9.2 Conclusión

Se ha demostrado que en el transformador analizado, en el que existe un flujo de calor de 650 W y donde corren peligro los componentes que lo integran por las altas temperaturas de trabajo, se consigue reducir su temperatura en 10°C, hecho que favorece el rendimiento del equipo. Como se ha demostrado la validez del modelo computacional en el Capítulo 8, puede afirmarse que se producirá la auto-refrigeración.

Además, mediante la instalación de este dispositivo, no sería necesario abrir el armario durante su funcionamiento, evitando así cualquier posible accidente por contacto directo con los componentes que se alojan en su interior. Y, con la sustitución del ventilador situado en la parte alta del armario, se ahorra el consumo eléctrico de éste que es, aproximadamente de 19,2 W.



## 10. CONCLUSIONES

A grandes rasgos, puede afirmarse que se han logrado los objetivos propuestos en el Capítulo 2 de este Proyecto Fin de Carrera. Se ha demostrado que la auto-refrigeración termoeléctrica es una tecnología viable y atractiva, ya que emplea energía residual.

A continuación se analiza cada uno de estos objetivos:

-Se ha realizado una revisión bibliográfica de la auto-refrigeración y se ha confirmado que, aparte una aplicación para refrigeración de equipos portátiles, no existen referencias anteriores que desarrollen este tema aplicado a cualquier equipo en general que necesiten refrigeración para un buen funcionamiento.

-Partiendo del modelo general de generación termoeléctrica se han introducidos las siguientes mejoras: Nuevo esquema de resistencias y capacidades, Actualización de la resistencia de carga  $R_l$ , Actualización de la resistencia térmica del disipador  $R_d$ , Distinción de los componentes P-N de los módulos y Programación matricial, lo cual ha supuesto un aumento en la velocidad de cálculo del modelo, además de una mayor precisión en los resultados.

-Mediante los ensayos experimentales, se ha demostrado que el sistema era capaz de auto-refrigerarse. Se ha ensayado el prototipo empleando equipos no vistos durante la carrera, lo que ha servido para familiarizarse con el mundo de la investigación: sus técnicas y protocolos.

-La validación del modelo se ha realizado con éxito, obteniendo unos errores relativos en la desviación de los valores simulados por el modelo computacional respecto a los experimentales pequeños, concretamente, inferiores al 2%. Se ha avanzado en la línea de investigación con esta validación permitiendo, a partir de ahora, realizar estudios con la fiabilidad y seguridad suficiente como para realizar avances tecnológicos.

-Con la propuesta de aplicación real, se demuestra el potencial que tiene esta nueva tecnología ante un mercado en el que, día a día, ahorrar energía es primordial. En el caso de estudio escogido, se ha conseguido reducir la temperatura operativa del transformador 10°C. La auto-refrigeración termoeléctrica supone un mayor aprovechamiento de los equipos, ya que pueden trabajar cerca de su potencia nominal sin tener que preocuparse tanto por las temperaturas límite de trabajo. Además, al



conseguir un enfriamiento gratuito, permitirá disminuir los costes económicos que conlleva mantener un sistema de refrigeración no autónomo.

-Se ha visto que pequeños avances en el desarrollo de módulos termoeléctricos pueden ampliar el abanico de áreas de trabajo. La generación de energía eléctrica aprovechando el calor residual, es una línea de investigación con mucho futuro.

Mi valoración personal es muy satisfactoria. El hecho de realizar un proyecto en investigación sobre una materia prácticamente inexplorada ha propiciado un entusiasmo y esfuerzo considerable, por el mero hecho de trabajar con una tecnología nueva. Siento que he puesto un pequeño grano de arena en una línea de investigación del grupo de Ingeniería térmica de la Universidad Pública de Navarra que espero les proporcione muchos logros.

## 11. LÍNEAS DE FUTURO

Analizando el final de este proyecto, se plantean diferentes líneas de futuro inmediatas:

1. Diseño, estudio económico y construcción de un sistema de auto-refrigeración termoeléctrico para la aplicación presentada y analizada en este proyecto. Consistiría en realizar un estudio mecánico de todos los componentes: forma, fijación, estudio óptimo del disipador y de los módulos; un análisis de la viabilidad económica: costes de inversión, ahorro económico, periodos de retorno, etc.; construir dicho sistema e instalarlo.
2. Búsqueda de otras aplicaciones en otros sectores de la industria, como por ejemplo el área mecánica. Habría que centrar la búsqueda en elementos que actualmente se refrigeren por aire, ya sea por convección natural o forzada y que dispusieran de características geométricas favorables para la colocación de módulos.
3. Mejora general del modelo de auto-refrigeración termoeléctrica, ya que en este proyecto se ha realizado una adaptación. Algunas de las posibilidades que esto plantea son el estudio de los parámetros más sensibles, la creación de una base de datos de más módulos termoeléctricos y otra de ventiladores y disipadores. Incluso podría llegarse a desarrollar una interfaz computacional para el modelo implementado.

## 12-BIBLIOGRAFÍA

- [1] Álvaro Martínez Echeverri, *AJUSTE Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE CÁLCULO COMPUTACIONAL PARA GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA*. Proyecto Final de Carrera.
- [2] Gary L. Solbrekken, Kazuaki Yazawa, Avram Bar-Cohen, "Heat driven cooling of portable electronics using thermoelectric technology", *Proceedings of the IEEE Transactions on advanced packaging*, vol. 31, May 2008.
- [3] Kazuaki Yazawa, Gary L. Solbrekken, Avram Bar-Cohen, "Thermoelectric-powered convective cooling of microprocessors", *Proceedings of the IEEE Transactions on advanced packaging*, vol. 28, May 2005.
- [4] Asier Gómez Larrainzar, *ESTUDIO DE LA AUTO-REFRIGERACIÓN DE CONVERTIDORES DE POTENCIA MEDIANTE SISTEMAS TERMOELÉCTRICOS*. Proyecto Final de Carrera.
- [5] M. D. Rowe, Min, Gao, S. G. K. Williams, A. Aoune, K. Matsuura, V. L. Kuznetsov, Li Wen Fu, "Thermoelectric recovery of waste heat - case studies", *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, vol. 2, pp. 1075-1079, 1997.
- [6] J. Chapman, "Transmisión de calor" (3ª edición), Ed. Bellisco, 1990.
- [7] Jack P.C. Kleijnen, Robert G. Sargent, "A methodology for fitting and validating metamodels in simulation", *European Journal of Operational Research*, October 1998.





# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

MODELIZACIÓN, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DE UN  
SISTEMA DE AUTO-REFRIGERACIÓN TERMOELÉCTRICA

ANEXOS

Jose Javier Lorrio Romera

Tutores: David Astrain Ulibarrena

Álvaro Martínez Echeverri

Pamplona, 26/11/2010

## 0-ÍNDICE

|                 |    |
|-----------------|----|
| ANEXO I .....   | 2  |
| ANEXO II .....  | 8  |
| ANEXO III ..... | 14 |

## ANEXO I: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DATOS COMPUTACIONALES

Como se indica en el Capítulo 6 de la memoria, en este anexo se adjunta el análisis estadístico de los datos computacionales detallado.

### ZONA 1

La siguiente tabla determina si el orden elegido para aproximar el modelo mediante un polinomio es el correcto o puede reducirse, siendo el escogido orden 3:

| Fuente       | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F      | Valor-P |
|--------------|-------------------|----|----------------|--------------|---------|
| Qinput [W]   | 9481,81           | 1  | 9481,81        | 935706938,98 | 0,0000  |
| Qinput [W]^2 | 2,08342           | 1  | 2,08342        | 205601,08    | 0,0000  |
| Qinput [W]^3 | 0,00317421        | 1  | 0,00317421     | 313,25       | 0,0000  |
| Modelo       | 9483,89           | 3  |                |              |         |

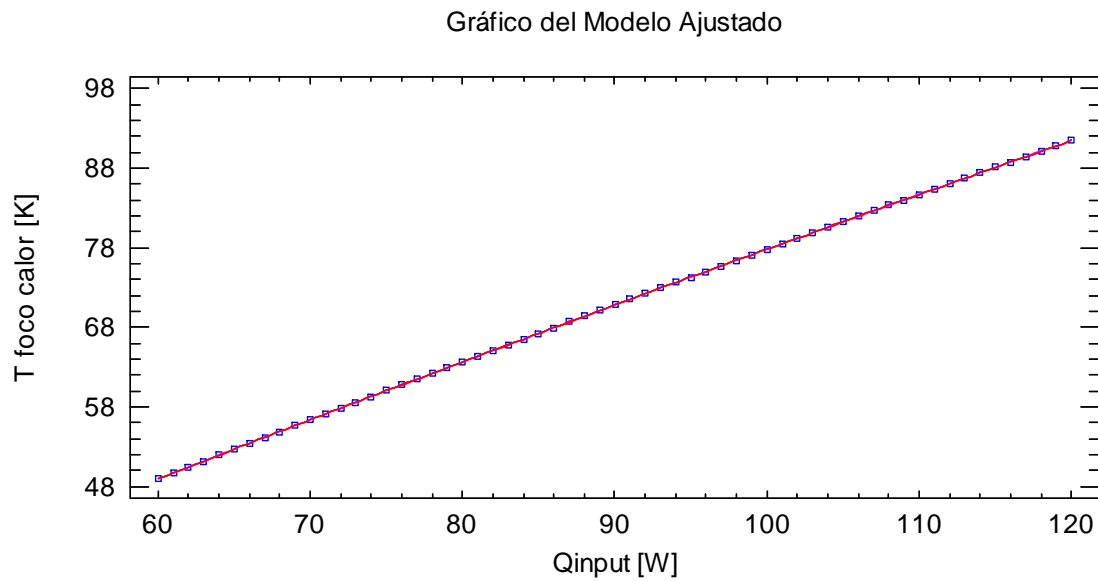
Tabla II.1-ANOVA para las variables según orden de ajuste

Si el P-valor es mayor que 0,05, debido a que se están considerando niveles de confianza del 95%, puede reducirse el orden en una unidad. En este caso, al ser cero, ajustar a un polinomio de tercer grado es correcto.

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo polinomial de tercer orden para describir la relación entre la temperatura del foco de calor y el flujo de potencia. La ecuación del modelo ajustado es

$$T_{\text{foco calor}} = 0,528476 + 0,868133 \cdot Q_{\text{input}} - 0,0011217 \cdot Q_{\text{input}}^2 + 0,00000168485 \cdot Q_{\text{input}}^3 \quad (\text{II.1})$$

El valor de  $R^2$  es de 100% y el de  $R^2_{\text{ajustado}}$ =100%, además, puesto que el P-Valor en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la temperatura del foco de calor y el flujo de potencia con un nivel de confianza del 95%.

**Figura II.1-Curva de ajuste del modelo**

En la figura II.1 se puede comprobar el buen ajuste entre los datos y el polinomio de tercer grado señalado. Sin embargo, a pesar de este buen ajuste, la aproximación no sería válida si los residuos presentasen un comportamiento anómalo, es decir, si no fueran completamente aleatorios ni siguieran una distribución normal de media cero y varianza constante.

Las siguientes figuras representan la distribución de los residuos en función de la variable de entrada (Figura II.2), en función de la variable de salida (Figura II.3) y en función del orden de realización de los ensayos (Figura II.4). Como se puede ver, en todas ellas se cumplen los requisitos de comportamiento para los residuos. Además, no existen residuos atípicos para ninguno de los casos señalados.



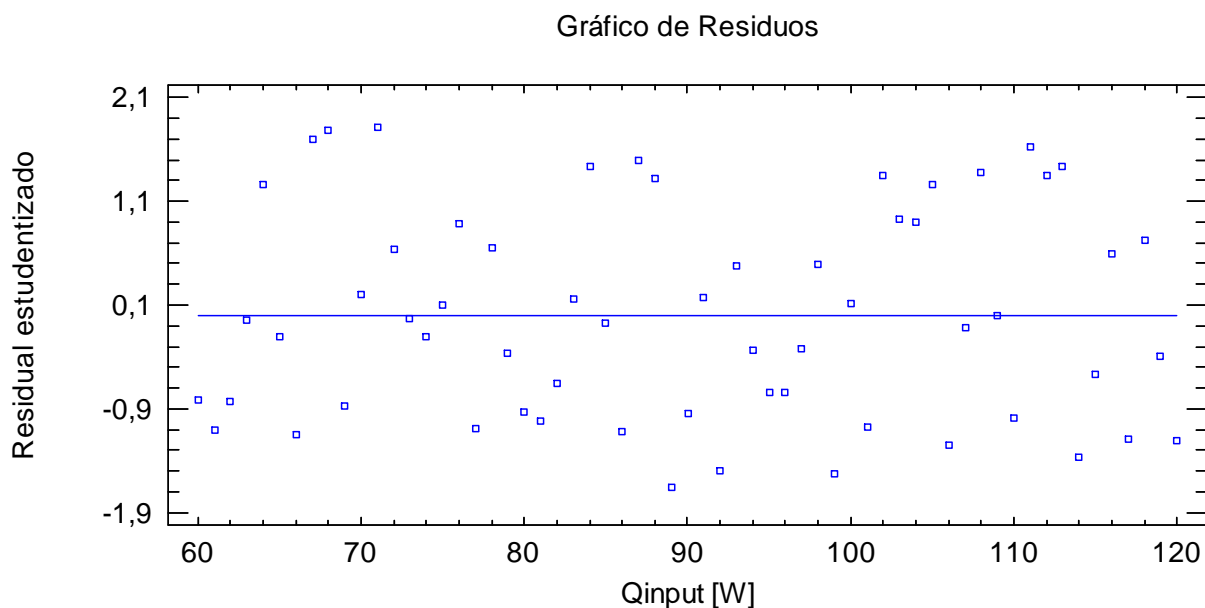


Figura II.2-Gráfico de dispersión de residuos frente a flujo de calor de entrada

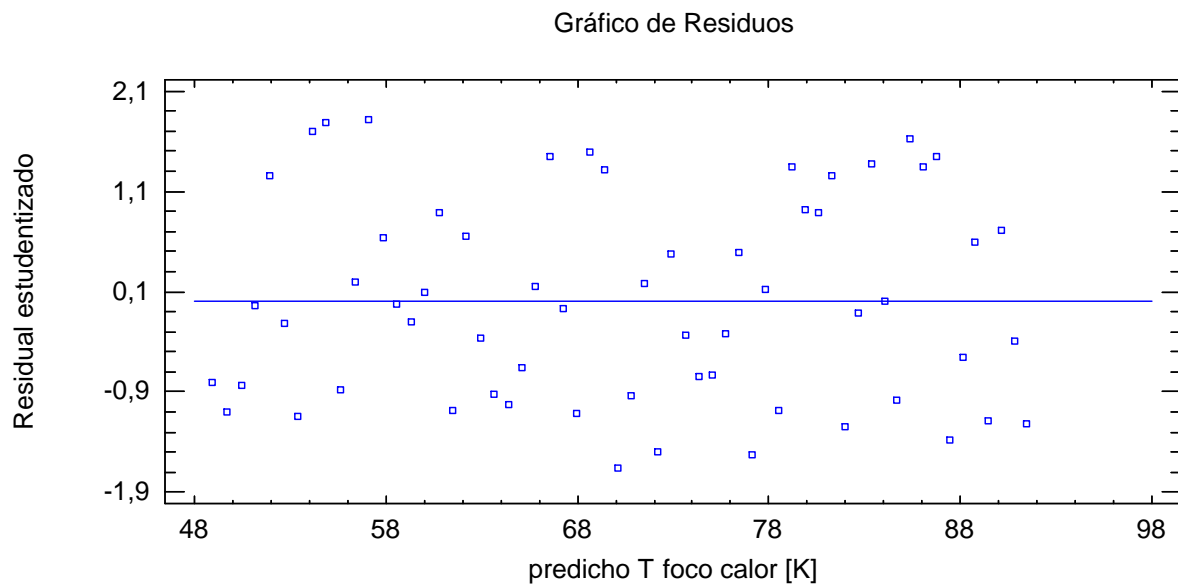


Figura II.3-Gráfico de dispersión de residuos frente a temperatura de foco de calor

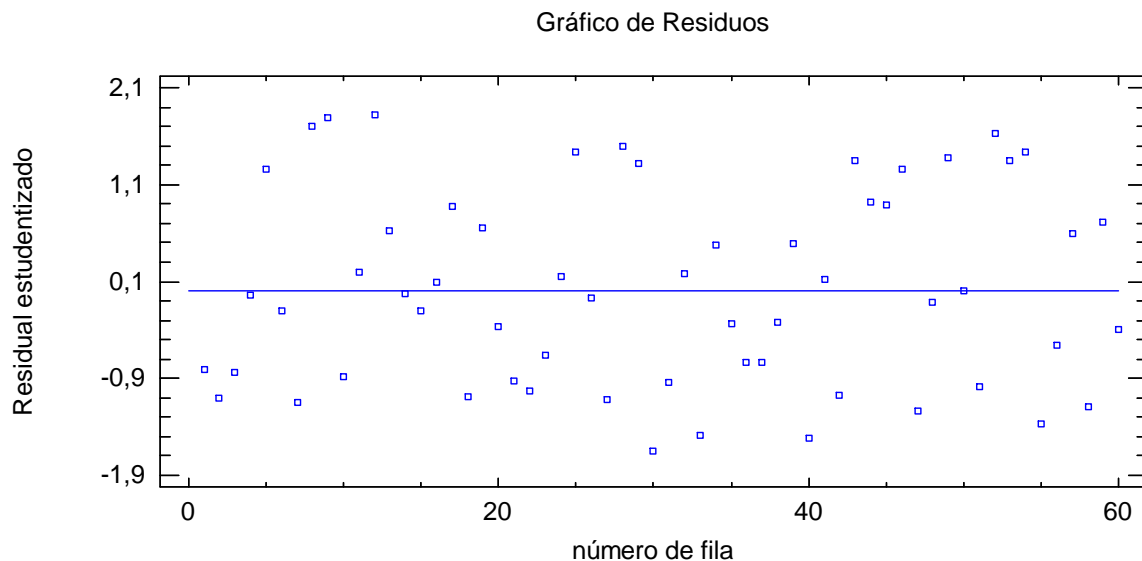


Figura II.4-Gráfico de dispersión de residuos frente a orden de realización de ensayos

## ZONA 2

El análisis estadístico realizado en esta zona es idéntico al de la Zona 1. Ha de recordarse que los flujos de potencia se han escogido de 2W en 2W en vez de intervalos de 1W como en la Zona 1, debido a que el intervalo comprendido entre 130W y 220W es superior al anterior y no era necesario tomar tantos datos.

El polinomio al que se ajusta el modelo en la Zona 2 es de tercer grado, hecho que se observa en la Tabla II.2 debido a que el P-Valor de la variable elevada al cubo es cero.

|              |               | Error        | Estadístico |         |
|--------------|---------------|--------------|-------------|---------|
| Parámetro    | Estimado      | Estándar     | T           | Valor-P |
| CONSTANTE    | -0,916962     | 0,188565     | -4,86285    | 0,0000  |
| Qinput [W]   | 0,699679      | 0,00332476   | 210,445     | 0,0000  |
| Qinput [W]^2 | -0,000850688  | 0,0000193093 | -44,0558    | 0,0000  |
| Qinput [W]^3 | 0,00000113175 | 3,69559E-8   | 30,6244     | 0,0000  |

Tabla II.2- ANOVA para las variables según orden de ajuste

La ecuación del modelo ajustado (II.2) posee una  $R^2$  de 100% y un  $R^2_{ajustado}=100\%$ , además, puesto que el P-Valor en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la temperatura del foco de calor y el flujo de potencia con un nivel de confianza del 95%.

$$T_{\text{foco calor}} = -0,916962 + 0,699679 \cdot Q_{\text{input}} - 0,000850688 \cdot Q_{\text{input}}^2 + 0,00000113175 \cdot Q_{\text{input}}^3 \quad (\text{II.2})$$

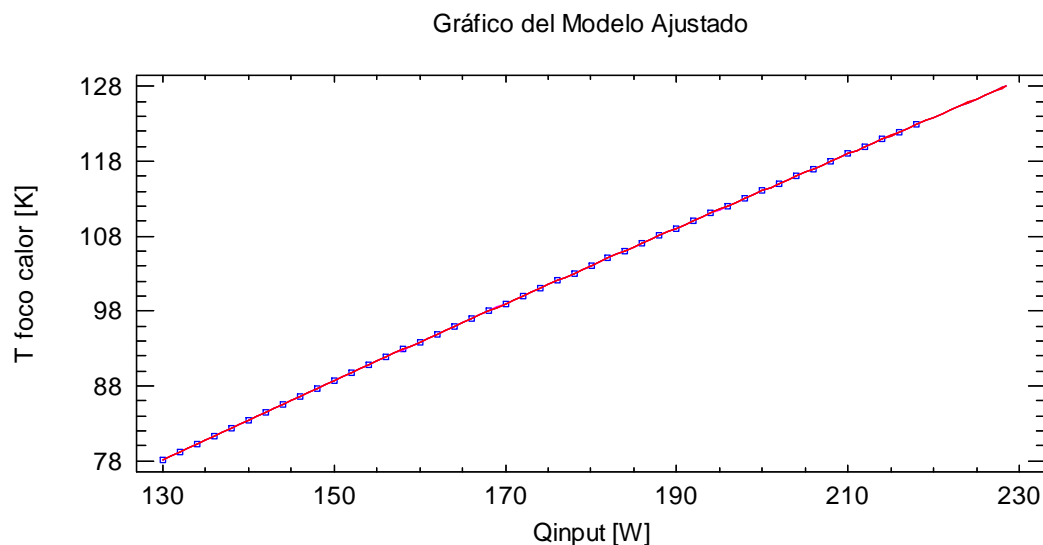


Figura II.5 Curva de ajuste del modelo

En la figura II.5 se observa el buen ajuste del modelo y un polinomio de tercer grado. Al igual que en el apartado anterior, es necesario estudiar los residuos para ver que cumplan las condiciones de un buen ajuste, lo cual puede comprobarse en Figura II.6, Figura II.7 y Figura II.8. Coincidiendo con los residuos estudiados en la Zona 1, en este intervalo no existen residuos atípicos en ninguna de estos gráficos.

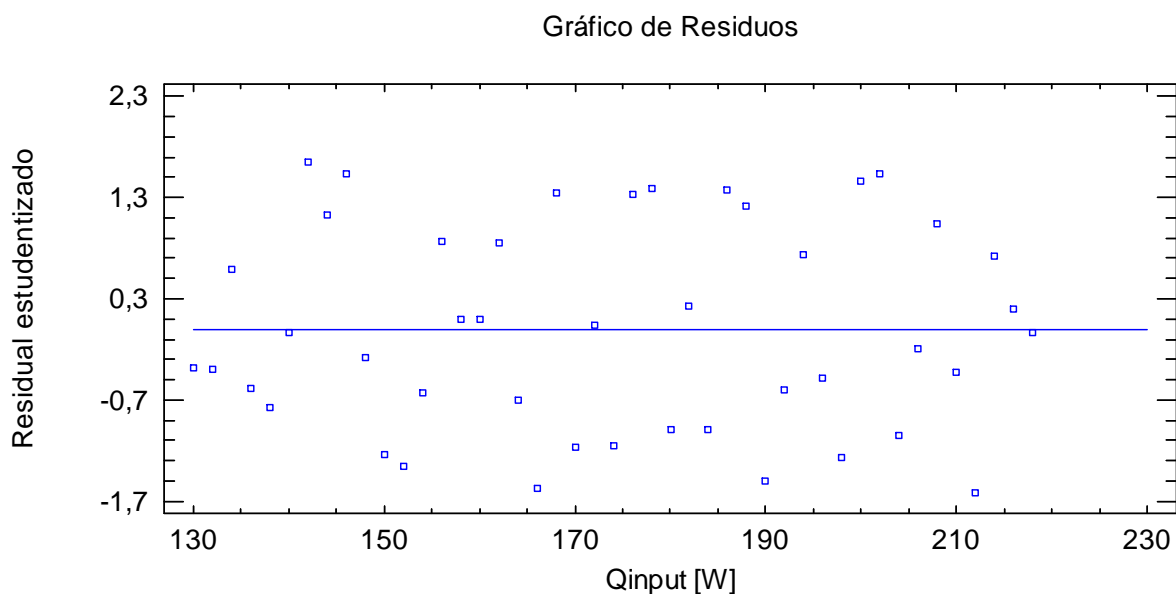


Figura II.6-Gráfico de dispersión de residuos frente a flujo de calor de entrada

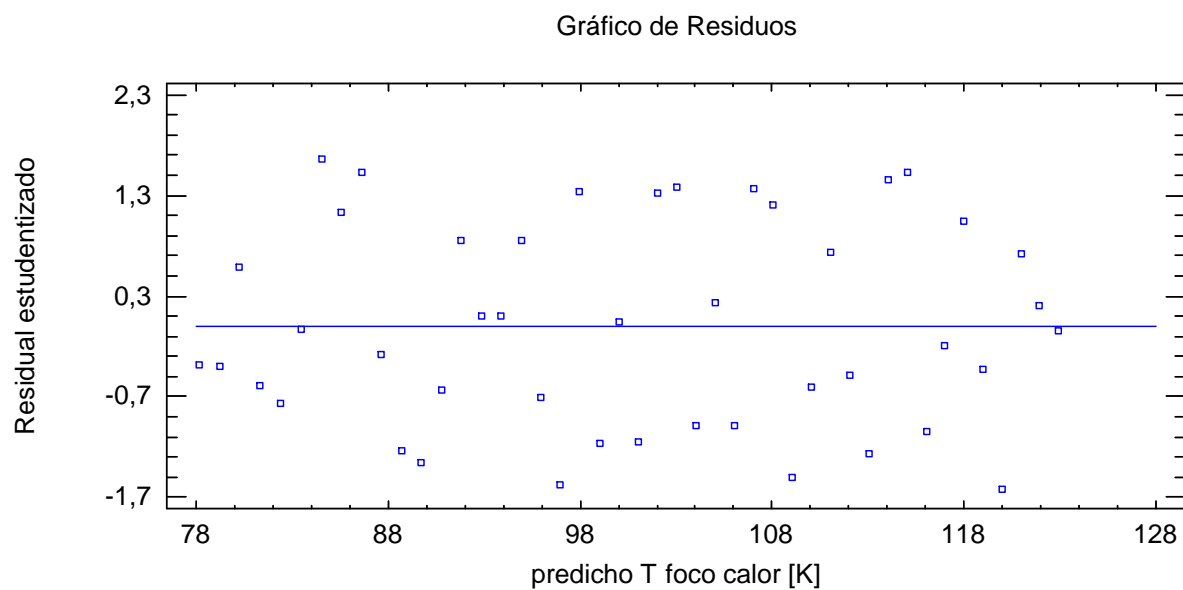


Figura II. 7-Gráfico de dispersión de residuos frente a temperatura de foco de calor

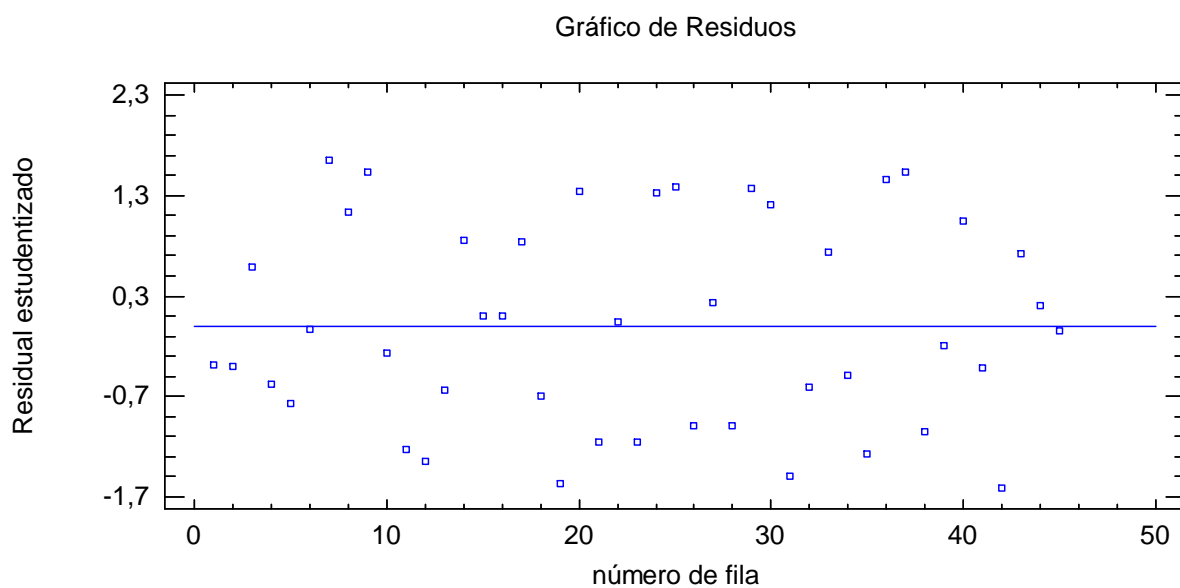


Figura II. 8-Gráfico de dispersión de residuos frente a orden de realización de ensayos

## ANEXO II: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DATOS EXPERIMENTALES

En este anexo, se detalla la regresión polinomial realizada con los datos experimentales comentado en el Capítulo 7 de la memoria.

### ZONA 1

| $Q_{resistencias}$<br>[W] | Módulos Termoelectricos |                      |                          |                             | Temperatura<br>foco calor [°C] |
|---------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|                           | $V_{multímetro}$ [V]    | $I_{multímetro}$ [A] | Potencia<br>generada [W] | Salto térmico<br>caras [°C] |                                |
| 60                        | 1,440                   | 0,085                | 0,122                    | 7,5                         | 50,7                           |
| 60                        | 1,440                   | 0,085                | 0,122                    | 7,4                         | 49,6                           |
| 60                        | 1,440                   | 0,085                | 0,122                    | 7,6                         | 50,7                           |
| 80                        | 1,800                   | 0,106                | 0,191                    | 9,1                         | 65,1                           |
| 80                        | 1,780                   | 0,105                | 0,187                    | 9,7                         | 63,5                           |
| 80                        | 1,780                   | 0,105                | 0,187                    | 9,6                         | 63,6                           |
| 100                       | 2,150                   | 0,126                | 0,271                    | 11,9                        | 78,7                           |
| 100                       | 2,140                   | 0,126                | 0,270                    | 12,0                        | 77,5                           |
| 100                       | 2,170                   | 0,128                | 0,278                    | 12,0                        | 77,4                           |
| 120                       | 2,570                   | 0,151                | 0,388                    | 14,1                        | 91,4                           |
| 120                       | 2,580                   | 0,152                | 0,392                    | 14,3                        | 92,3                           |
| 120                       | 2,590                   | 0,152                | 0,394                    | 14,2                        | 92,0                           |

Tabla III.1-Datos experimentales Zona 1

Los datos experimentales estudiados en esta zona pueden ajustarse a un polinomio de grado uno (III.1), hecho esperado ya que, al ajustar el modelo computacional a grado tres, la aproximación de los experimentales debía ser de ese mismo grado o menor. Como se observa en la tabla, el P-Valor es igual a cero, por lo que el ajuste se considera como válido.

|                 |          | Error      | Estadístico |         |
|-----------------|----------|------------|-------------|---------|
| Parámetro       | Estimado | Estándar   | T           | Valor-P |
| CONSTANTE       | 8,484    | 0,826176   | 10,269      | 0,0000  |
| $Q_{input}$ [W] | 0,69615  | 0,00890888 | 78,1411     | 0,0000  |

Tabla III.2- ANOVA para las variables según orden de ajuste

$$Temperatura\ foco\ de\ calor = 8,484 + 0,69615 * Q_{input} \quad (III.1)$$

El valor de  $R^2$  es de 99,83% y el de  $R^2$  ajustado de 99,82%, además, puesto que el P-Valor en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la temperatura del foco de calor y el flujo de potencia con un nivel de confianza del 95%.

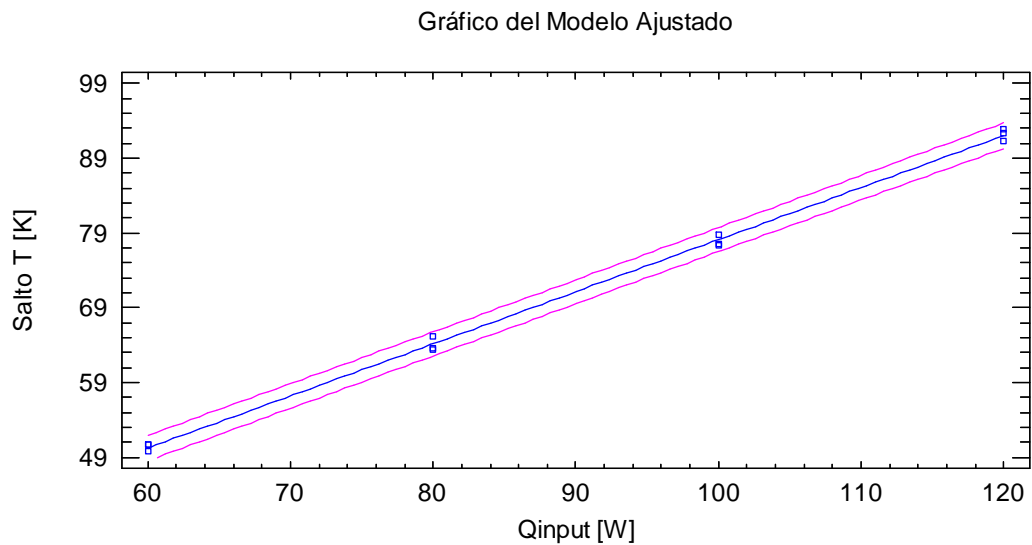


Figura III.1- Gráfica del modelo ajustado con intervalos de predicción

Las siguientes figuras representan la distribución de los residuos en función de la variable de entrada (Figura III.2), en función de la variable de salida (Figura III.3) y en función del orden de realización de los ensayos (Figura III.4). Como se puede ver, en todas ellas se cumplen los requisitos de comportamiento para los residuos (independientes, distribución normal de media cero y varianza constante). Además, no existen residuos atípicos para ninguno de los casos señalados.

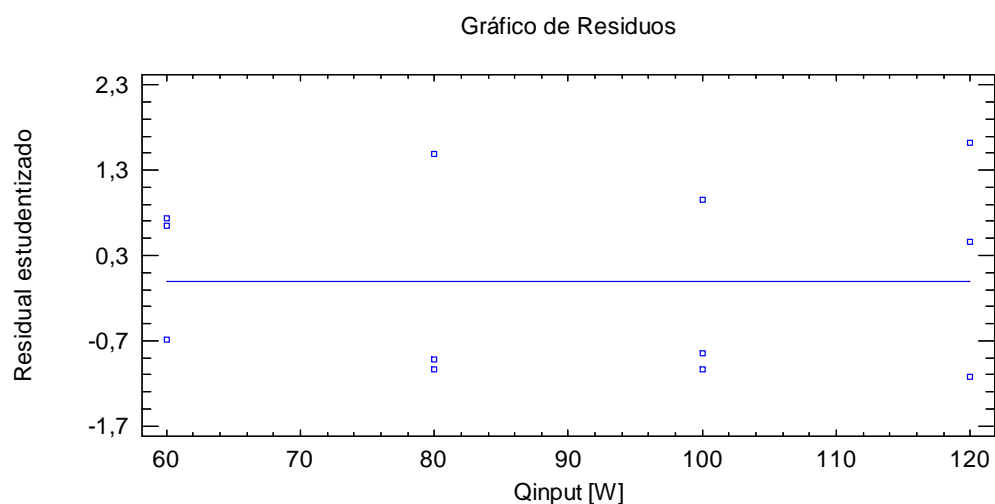


Figura III.2-Gráfico de dispersión de residuos frente a flujo de calor de entrada

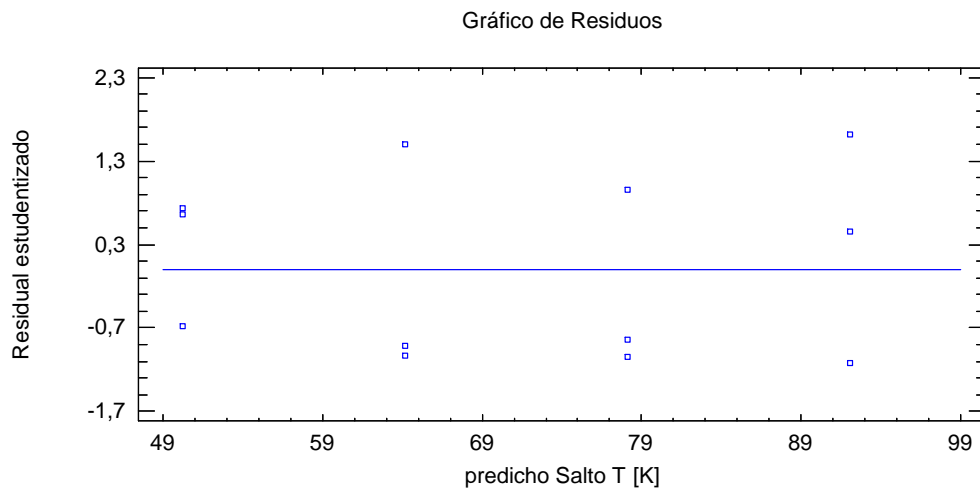


Figura III.3- Gráfico de dispersión de residuos frente a temperatura de foco de calor

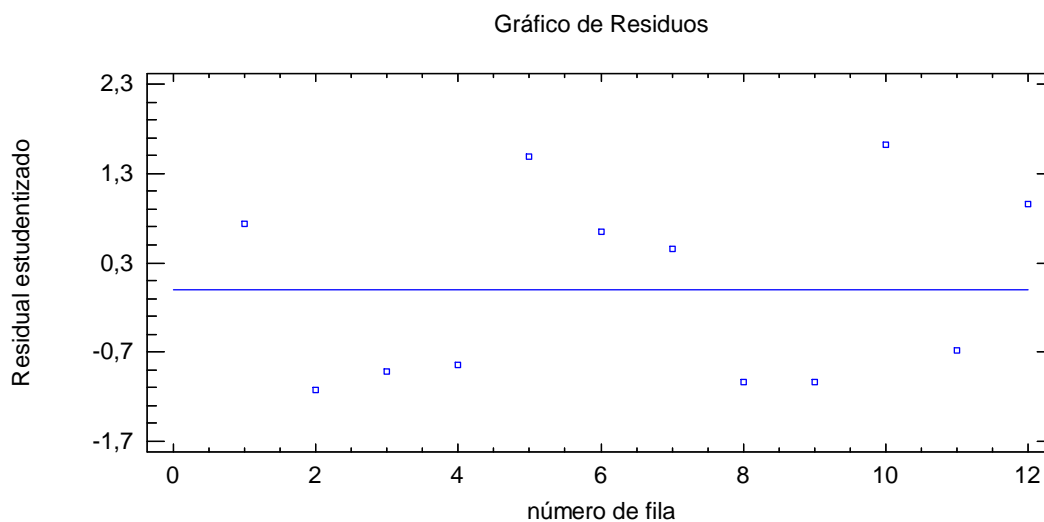


Figura III.4- Gráfico de dispersión de residuos frente a orden de realización de ensayos

## ZONA 2

| $Q_{\text{resistencias}}$<br>[W] | Módulos Termoeléctricos     |                             |                          |                             | Temperatura<br>foco calor [°C] |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|                                  | $V_{\text{multímetro}}$ [V] | $I_{\text{multímetro}}$ [A] | Potencia<br>generada [W] | Salto térmico<br>caras [°C] |                                |
| 130                              | 6,400                       | 0,107                       | 0,685                    | 24,13                       | 78,7                           |
| 130                              | 6,490                       | 0,108                       | 0,701                    | 24,99                       | 77,4                           |
| 130                              | 6,560                       | 0,109                       | 0,715                    | 24,44                       | 77,3                           |
| 160                              | 8,240                       | 0,137                       | 1,129                    | 30,85                       | 93,3                           |
| 160                              | 8,250                       | 0,138                       | 1,139                    | 30,99                       | 91,7                           |
| 160                              | 8,250                       | 0,138                       | 1,139                    | 31,48                       | 91,9                           |
| 190                              | 9,940                       | 0,166                       | 1,650                    | 36,82                       | 107,9                          |
| 190                              | 9,930                       | 0,166                       | 1,648                    | 36,47                       | 107,0                          |
| 190                              | 10,010                      | 0,167                       | 1,672                    | 37,41                       | 106,3                          |
| 220                              | 11,590                      | 0,193                       | 2,237                    | 42,72                       | 123,0                          |
| 220                              | 11,580                      | 0,193                       | 2,235                    | 42,44                       | 121,5                          |
| 220                              | 11,640                      | 0,194                       | 2,258                    | 41,97                       | 121,9                          |

Tabla III.3-Datos experimentales Zona 2

El estudio estadístico realizado en esta zona es idéntico al de la Zona 1. El polinomio que mejor ajusta a estos puntos es de grado uno (III.2).

|                        |          | Error      | Estadístico |         |
|------------------------|----------|------------|-------------|---------|
| Parámetro              | Estimado | Estándar   | T           | Valor-P |
| CONSTANTE              | 13,6278  | 1,13467    | 12,0103     | 0,0000  |
| $Q_{\text{input}}$ [W] | 0,492556 | 0,00636794 | 77,3493     | 0,0000  |

Tabla III.4- ANOVA para las variables según orden de ajuste

$$\text{Temperatura foco de calor} = 13,6278 + 0,492556 * Q_{\text{input}} \quad (\text{III.2})$$

En este caso la  $R^2$  es de 99,83% y la  $R^2$  ajustada de 99,81%.



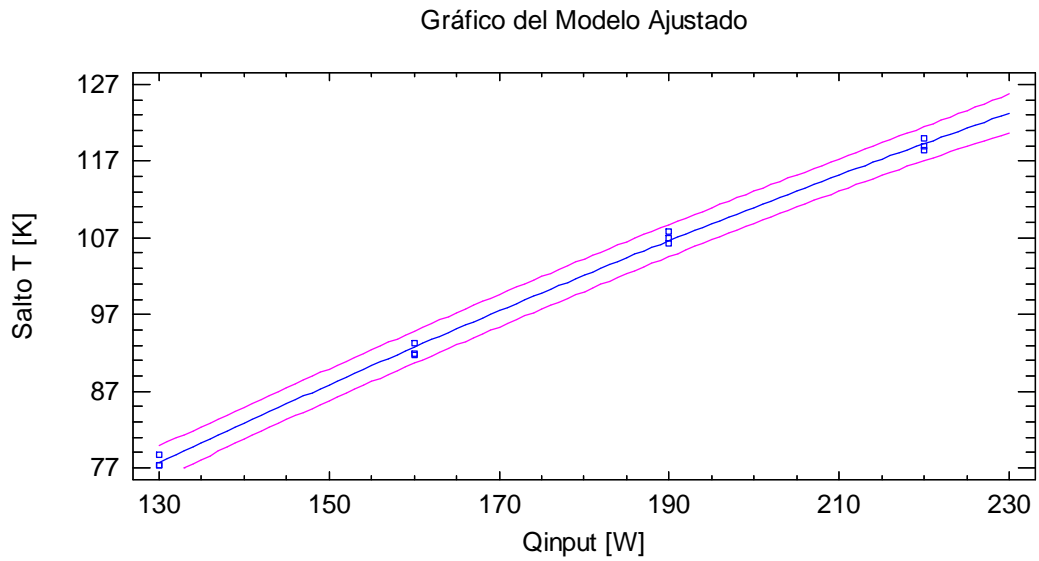


Figura III.5-Gráfica del modelo ajustado con intervalos de predicción

Los residuos mostrados en las siguientes gráficas, también cumplen las hipótesis para que esta aproximación sea estadísticamente válida.

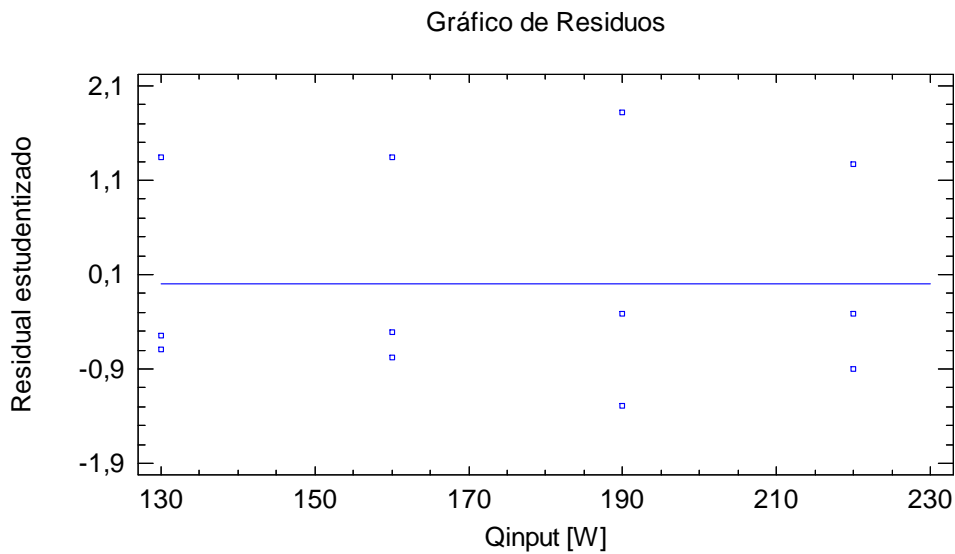


Figura III.6-Gráfico de dispersión de residuos frente a flujo de calor de entrada

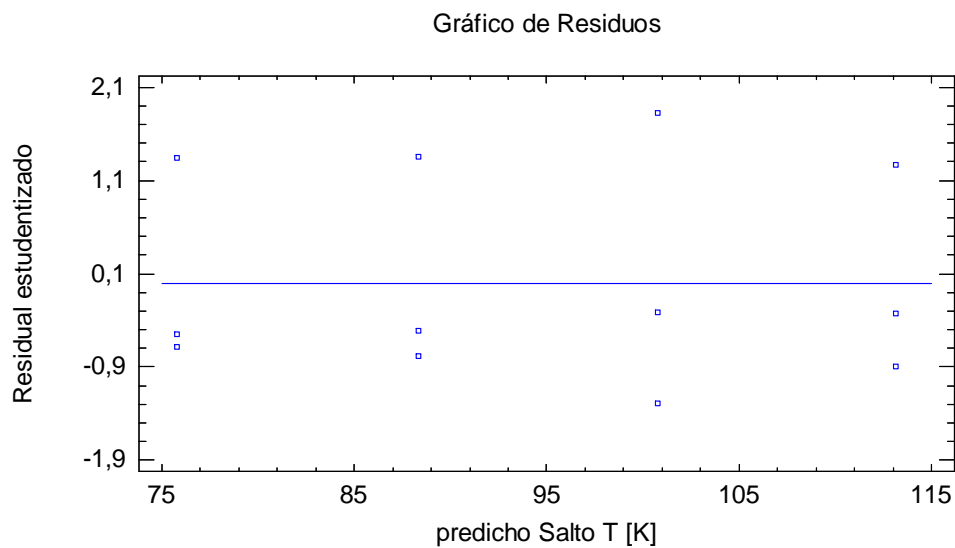


Figura III.7-Gráfico de dispersión de residuos frente a temperatura de foco de calor

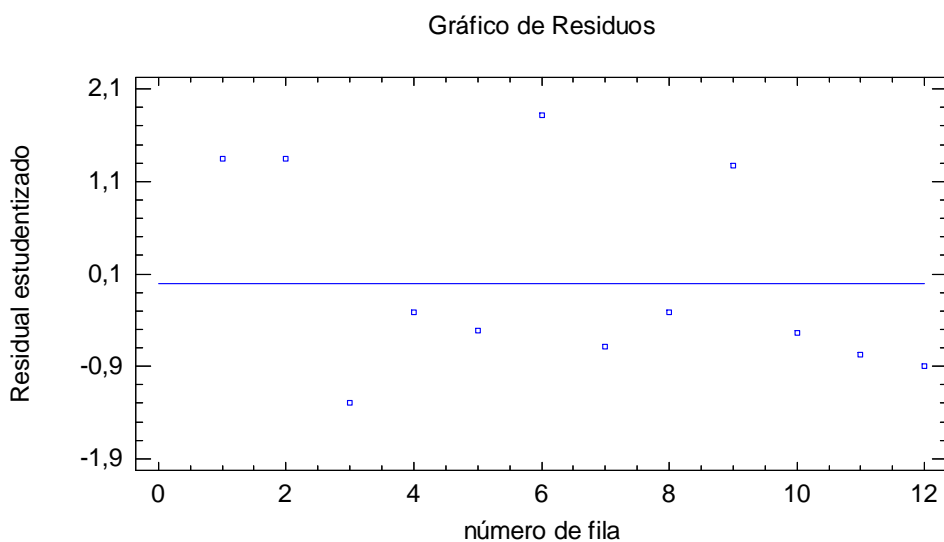


Figura III.8-Gráfico de dispersión de residuos frente a orden de realización de ensayos

## ANEXO III: LENGUAJE COMPUTACIONAL

En el presente anexo, se adjunta el lenguaje computacional correspondiente a las mejoras añadidas a la adaptación del modelo de generación termoelectrónica.

### Actualización de la resistencia de carga R1

```
%ACTUALIZA_RL
%Actualizamos la resistencia de carga en función de la potencia que se
%genera. La potencia de corte depende del ventilador utilizado.

if P(cont)<0.4
    Rl(cont)=17;
else
    Rl(cont)=60;
end
```

### Actualización de la resistencia térmica del disipador Rd

```
%ACTUALIZA_Rd
%Actualiza el valor de la resistencia en el disipador

if Rl(cont)==17;
    Rd(cont)=4.8;
else
    Porcentaje(cont)=P(cont)/2.6;
    %Curva del ventilador y=aX3+bX2+cX+d
    %Pérdidas de carga y=-0.269*X^2+6.8028*X+1.3307
    a=0.0102*Porcentaje(cont)^4-
    0.2045*Porcentaje(cont)^3+0.0208*Porcentaje(cont)^2-
    0.0076*Porcentaje(cont)+0.0017;
    b=-0.351;
    c=-0.0718*Porcentaje(cont)^2+0.1889*Porcentaje(cont)+0.0798;
    d=-12.227*Porcentaje(cont)^2+50.969*Porcentaje(cont)+5.2847;
    F=[a (b+0.269) (c-6.8028) (d-1.3307)];
    r=roots(F);
    flujo=r(3);

    Rfluent=0.0001*flujo^2-0.0145*flujo+0.57;
    Rd(cont)=0.8*4*Rfluent;

end
```

### Distinción P-N

```
%VARIABLES_MODULO_TIPO_H
%Variables del módulo Peltier de tipo H (TGM-287-1.0-1.5)

Anchom=4; %Ancho del modulo (cm)
Fondom=4; %Fondo del módulo (cm)

% 1.1 Semiconductor
```

```

N=287; %Número de termopares
L=0.14; %Longitud de cada semiconductor N ó P (cm)
Ancho=0.11; %Ancho de cada semiconductor N ó P (cm)
Fondo=0.11; %Fondo de cada semiconductor N ó P (cm)
dN=6892; %Densidad de cada semiconductor N (Kg/m3)
cpN=544.28; %Calor específico de cada semiconductor N (J/Kg*K)
dP=6892; %Densidad de cada semiconductor P (Kg/m3)
cpP=544.28; %Calor específico de cada semiconductor P (J/Kg*K)

%Ctes de ajuste del coeficiente Seebeck (V/K)
aa=1; %Corrige las curvas del coeficiente Seebeck
%Semiconductor tipo N
ctealfa1=1.17657e-2; ctealfa2=-2.23444e-4; ctealfa3=1.73108e-6;
ctealfa4=-7.07601e-9; ctealfa5=1.60310e-11; ctealfa6=-1.90501e-14;
ctealfa7=9.27466e-18;
%Semiconductor tipo P
ctealfa8=-1.17657e-2; ctealfa9=2.23444e-4; ctealfa10=-1.73108e-6;
ctealfa11=7.07601e-9; ctealfa12=-1.60310e-11; ctealfa13=1.90501e-14;
ctealfa14=-9.27466e-18;

ctealfaN=[ctealfa1 ctealfa2 ctealfa3 ctealfa4 ctealfa5 ctealfa6
ctealfa7];
ctealfaP=[ctealfa8 ctealfa9 ctealfa10 ctealfa11 ctealfa12 ctealfa13
ctealfa14];

% Ctes de ajuste de la conductividad termica (W/m*K)
bb=1; %Corrige las curvas de la conductividad térmica
%Semiconductor tipo N
ctek1=4.80968; ctek2=-1.95930e-2; ctek3=2.91399e-5; ctek4=0; ctek5=0;
ctek6=0; ctek7=0;
%Semiconductor tipo P
ctek8=4.80968; ctek9=-1.95930e-2; ctek10=2.91399e-5; ctek11=0;
ctek12=0; ctek13=0; ctek14=0;

ctekN=[ctek1 ctek2 ctek3 ctek4 ctek5 ctek6 ctek7];
ctekP=[ctek8 ctek9 ctek10 ctek11 ctek12 ctek13 ctek14];

%Ctes de ajuste de la resistividad eléctrica (Ohm*cm)
cc=1; %Corrige las curvas de la resistividad eléctrica
%Semiconductor tipo N
cteresi1=-2.75414e-4; cteresi2=4.35357e-6; cteresi3=0; cteresi4=0;
cteresi5=0; cteresi6=0; cteresi7=0;
%Semiconductor tipo P
cteresi8=-2.75414e-4; cteresi9=4.35357e-6; cteresi10=0; cteresi11=0;
cteresi12=0; cteresi13=0; cteresi14=0;

cteresiN=[cteresi1 cteresi2 cteresi3 cteresi4 cteresi5 cteresi6
cteresi7];
cteresiP=[cteresi8 cteresi9 cteresi10 cteresi11 cteresi12 cteresi13
cteresi14];

% 1.2 Uniones entre semiconductores (u)
Lu=0.040; %Longitud de cada unión (cm)
Anchou=0.22; %Ancho de cada unión (cm)
Fondou=0.12; %Fondo de cada unión (cm)
ku=401; %Conductividad termica del material de unión (W/m*K)
du=8930; %Densidad del material de unión (Kg/m3)
cpu=385; %Calor específico del material de unión (J/Kg*K)

```

```
resiu=0.000011; %Resistividad eléctrica del material de unión  
(Ohm*cm2)
```

```
% 1.3 Cerámico (c)
```

```
Lc=0.075; %Longitud del material cerámico (cm)
```

```
Anchoc=Anchom; %Ancho del material cerámico (cm)
```

```
Fondoc=Fondom; %Fondo del material cerámico (cm)
```

```
kc=35; %Conductividad termica del material cerámico (W/m*K)
```

```
dc=3900; %Densidad del material cerámico (Kg/m3)
```

```
cpc=850; %Calor específico del material cerámico (J/Kg*K)
```

